

DISEÑO DE UNA GRÚA TIPO PESCANTE PARA CAMBIO DE ALMOHADILLAS  
EN CAJAS DE LAMINACIÓN DE TERNIUM SIDERURGICA DE CALDAS

MARIA ALEJANDRA VÁSQUEZ CASTAÑO  
JOSE ALEJANDRO OROZCO HENAO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DICIEMBRE DE 2018  
PEREIRA

DISEÑO DE UNA GRÚA TIPO PESCANTE PARA CAMBIO DE ALMOHADILLAS  
EN CAJAS DE LAMINACIÓN DE TERNIUM SIDERURGICA DE CALDAS

MARIA ALEJANDRA VÁSQUEZ CASTAÑO  
JOSE ALEJANDRO OROZCO HENAO

Trabajo de investigación formativa para optar por el título de Ingenieros Mecánicos

Orientador: Ing. Carlos Andrés Mesa Montoya

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DICIEMBRE DE 2018  
PEREIRA

Nota de aceptación: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

## **DEDICATORIA**

Dedicado a quienes me conocen a fondo y saben que son mi motor de vida:

A mis padres Gloria Patricia y Luis Orlando por sus consejos y enseñanzas, por hacer de mí la persona que soy y, sobre todo, por inculcarme el amor por cada cosa que hago.

A mi hermano Juan José por su compañía, complicidad y alegría.

Ma Alejandra Vásquez C.

A mis padres Jorge Orozco y Paula Henao quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido alcanzar hoy un logro más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades.

A Juanita Orozco y Camila Ossa por su cariño, comprensión y apoyo incondicional en cada etapa de este proceso.

J. Alejandro Orozco H.

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de este trabajo fue posible gracias a muchas personas...  
compañeros y profesores, amigos y familiares. Especialmente debo mencionar  
algunos:

Gracias a Alejandro por ser mi compañero en este proyecto que, aunque difícil y  
un poco apresurado, fue de bastante aprendizaje.

A mi novio, por su paciencia y amor cada día, gracias por motivarme a lograrlo y  
acompañarme durante mis estudios.

Al ingeniero Carlos Andrés Mesa Montoya por ser la guía de este proyecto, sus  
recomendaciones y la disposición para transmitirnos todo su conocimiento.

Gracias también a Ternium Siderúrgica de Caldas por la colaboración brindada, la  
disposición de su información, personal e instalaciones para la culminación de  
este proceso.

Ma Alejandra Vásquez C.

Agradezco a mis mentores en diferentes procesos de formación: Carlos Mesa,  
Rómulo Ramos y Sebastián Giraldo, quienes aportaron su valioso conocimiento  
para hacerme crecer como profesional.

J. Alejandro Orozco H.

## CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN .....	20
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	21
1.3. OBJETIVOS.....	21
1.3.1. Objetivo general .....	21
1.3.2. Objetivos específicos .....	22
1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO .....	22
2. RECONOCIMIENTO DEL PROBLEMA .....	23
2.1. ELEMENTOS PARA INTERVENIR .....	24
2.1.1. Alargaderas .....	24
2.1.2. Almohadillas .....	25
2.2. DEFINICIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO .....	26
2.3. TIPOS DE GRÚAS .....	27
2.3.1. Puente grúa monorriel.....	27
2.3.2. Puente grúa birriel .....	28
2.3.3. Grúa giratoria de columna giratoria (pescante) .....	29
2.3.4. Grúa giratoria de columna fija .....	29
2.3.5. Grúa pórtico .....	30
2.3.6. Grúa semipórtico .....	31
2.4. ANÁLISIS DE CAJA NEGRA.....	32
2.4.1. Matriz de decisión .....	33
3. DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA GRÚA.....	35
3.1. PARTES DE UNA GRÚA PESCANTE .....	35
3.2. CONSIDERACIONES DE OPERACIÓN .....	36
3.2.1. Definición de la carga.....	36
3.2.2. Factor de seguridad .....	38
3.2.3. Material .....	38
3.2.4. Dimensiones establecidas y velocidad de trabajo .....	38
3.3. ANÁLISIS DEL DISEÑO POR CARGA ESTÁTICA .....	39
3.3.1. Resistencia estática en el tubo.....	41

3.3.2.	Resistencia estática en la viga .....	51
3.3.3.	Cargas de impacto .....	59
3.3.4.	Teorema de Castigliano .....	60
3.3.5.	Excentricidad por fórmula de la secante .....	64
3.4.	ANÁLISIS DEL DISEÑO POR FATIGA .....	68
3.4.1.	Análisis en el tubo .....	71
3.4.2.	Análisis en la viga.....	73
3.5.	ELEMENTOS SELECCIONADOS DE CATÁLOGO .....	76
4.	VALIDACIÓN DEL DISEÑO EN SOFTWARE CAE .....	77
4.1.	CONSIDERACIONES PREVIAS A LA SIMULACIÓN .....	77
4.1.1.	Modelo .....	77
4.1.2.	Restricciones.....	78
4.1.3.	Material .....	80
4.1.4.	Cargas.....	80
4.1.5.	Mallado.....	82
4.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO.....	84
4.2.1.	Pre-proceso.....	84
4.2.2.	Simulación y resultados .....	85
4.2.3.	Análisis de resultados .....	90
4.3.	ANÁLISIS POR FATIGA.....	91
4.3.1.	Pre-proceso.....	91
4.3.2.	Simulación y resultados .....	91
4.3.3.	Análisis de resultados .....	101
4.4.	PLANOS DE DISEÑO.....	102
5.	FABRICACIÓN DE LA GRÚA PESCANTE .....	103
5.1.	SOBRE EL MONTAJE ESTRUCTURAL DE LA GRÚA.....	103
5.1.1.	Acometida eléctrica .....	103
5.1.2.	Fijación.....	104
5.2.	SOBRE EL POLIPASTO.....	107
5.2.1.	Instalación .....	107
5.2.2.	Ubicación .....	107
5.2.3.	Dirección del movimiento .....	107
5.3.	PROCESO DE FABRICACIÓN .....	108

5.3.1.	Adecuación de tubo y solicitud elementos externos.....	108
5.3.2.	Ensamble de partes .....	108
5.3.3.	Fijación.....	108
5.3.4.	Ubicación de accesorios .....	112
5.3.5.	Puesta en marcha .....	112
5.4.	RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO .....	114
5.4.1.	Polipasto .....	118
5.4.2.	Ganchos de izaje.....	120
5.5.	SEGURIDAD AL UTILIZAR GRÚAS PESCANES .....	122
6.	CONCLUSIONES, APORTES Y RECOMENDACIONES .....	124
6.1.	CONCLUSIONES .....	124
6.2.	APORTES.....	125
6.3.	RECOMENDACIONES.....	125
	BIBLIOGRAFÍA .....	127
	ANEXOS.....	129



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ensamble de acople y almohadillas.....	23
Figura 2. Ubicación de las almohadillas entre el acople y la alargadera.....	24
Figura 3. Esquema dimensional de las alargaderas .....	25
Figura 4. Esquema de almohadillas.....	26
Figura 5. Esquema de trabajo en el tren continuo .....	27
Figura 6. Puente grúa monorriel .....	28
Figura 7. Puente grúa birriel .....	28
Figura 8. Grúa giratoria de columna giratoria .....	29
Figura 9. Grúa giratoria de columna fija .....	30
Figura 10. Grúa pórtico .....	31
Figura 11. Grúa semipórtico .....	31
Figura 12. Análisis de caja negra.....	32
Figura 13. Árbol de funciones .....	33
Figura 14. Simplificación de estructura .....	36
Figura 15. Carga de la grúa .....	37
Figura 16. Plano donde ocurren los esfuerzos octaédricos .....	39
Figura 17. Teorías de falla estática.....	40
Figura 18. Estado de esfuerzo para aplicar TECO .....	41
Figura 19. Esquema para análisis estático en tubo .....	42
Figura 20. Distribución de cargas en el tubo.....	43
Figura 21. Puntos críticos en la sección transversal del tubo .....	44
Figura 22. Distribución del esfuerzo axial .....	45
Figura 23. Dirección del momento resultante.....	46
Figura 24. Distribución del esfuerzo flector.....	47
Figura 25. Distribución del esfuerzo cortante.....	48
Figura 26. Distribución del esfuerzo de torsión .....	49
Figura 27. Esquema para análisis estático en viga.....	51
Figura 28. Perfil viga IPE 160 .....	51
Figura 29. Propiedades de la sección IPE 160 .....	52
Figura 30. Distribución de cargas en la sección de la viga .....	53
Figura 31. Puntos críticos en la sección transversal de la viga.....	54
Figura 32. Distribución del esfuerzo flector.....	56
Figura 33. Distribución del esfuerzo cortante.....	57
Figura 34. Distribución del esfuerzo de torsión .....	58
Figura 35. Esquema para análisis por Teorema de Castigliano, plano XY .....	61
Figura 36. Diagrama de cuerpo libre plano XY .....	61
Figura 37. Esquema para análisis por Teorema de Castigliano, plano XZ .....	63
Figura 38. Diagrama de cuerpo libre plano XZ .....	63
Figura 39. Diagrama de cuerpo libre de la viga para cálculo de excentricidad .....	65
Figura 40. Diagrama de cuerpo libre del tubo para cálculo de excentricidad.....	65

Figura 41. Teorías de falla por fatiga .....	69
Figura 42. Comportamiento de la carga respecto al tiempo .....	70
Figura 43. Modelo CAD para simulación .....	78
Figura 44. Soporte fijo en tubo para simulación .....	79
Figura 45. Soporte fijo en viga para simulación .....	79
Figura 46. Configuración de fuerzas remotas en el tubo .....	81
Figura 47. Configuración de fuerzas en la viga .....	81
Figura 48. Tramo de malla para simulación .....	83
Figura 49. Detalle sizing en mallado conexión con viga .....	83
Figura 50. Detalle sizing en mallado base de tubo .....	84
Figura 51. Calidad de la malla .....	84
Figura 52. Esfuerzo promedio en tubo - Análisis estático .....	85
Figura 53. Esfuerzo detalle en tubo - Análisis estático .....	86
Figura 54. Deformación total máxima en tubo - Análisis estático .....	86
Figura 55. Deformación elástica equivalente en tubo - Análisis estático .....	87
Figura 56. Factor de seguridad promedio en tubo - Análisis estático .....	87
Figura 57. Esfuerzo promedio en viga - Análisis estático .....	88
Figura 58. Esfuerzo detalle en viga - Análisis estático .....	88
Figura 59. Deformación total máxima en viga - Análisis estático .....	89
Figura 60. Deformación elástica equivalente en viga - Análisis estático .....	89
Figura 61. Factor de seguridad promedio en viga - Análisis estático .....	90
Figura 62. Esfuerzo promedio en tubo - Análisis por fatiga .....	92
Figura 63. Esfuerzo detalle en tubo - Análisis por fatiga .....	92
Figura 64. Deformación total en tubo - Análisis por fatiga .....	93
Figura 65. Deformación elástica equivalente en tubo - Análisis por fatiga .....	93
Figura 66. Factor de seguridad promedio en tubo - Análisis por fatiga .....	94
Figura 67. Vida útil en tubo - Análisis por fatiga .....	94
Figura 68. Biaxialidad en tubo - Análisis por fatiga .....	95
Figura 69. Factor de seguridad por fatiga en tubo - Análisis por fatiga .....	95
Figura 70. Sensibilidad a la fatiga en tubo - Análisis por fatiga .....	96
Figura 71. Esfuerzo promedio en viga - Análisis por fatiga .....	97
Figura 72. Esfuerzo detalle en viga - Análisis por fatiga .....	97
Figura 73. Deformación total máxima en viga - Análisis por fatiga .....	98
Figura 74. Deformación elástica equivalente en viga - Análisis por fatiga .....	98
Figura 75. Factor de seguridad promedio en viga - Análisis por fatiga .....	99
Figura 76. Vida útil en viga - Análisis por fatiga .....	99
Figura 77. Biaxialidad en viga - Análisis por fatiga .....	100
Figura 78. Factor de seguridad por fatiga en viga - Análisis por fatiga .....	100
Figura 79. Sensibilidad a la fatiga en viga - Análisis por fatiga .....	101
Figura 80. Esquema de cimentación con tornillo de anclaje .....	104
Figura 81. Esquema de anclajes ideales .....	105
Figura 82. Esquema de placa intermedia sobre hormigón .....	105
Figura 83. Esquema placa intermedia sobre forjado de hormigón .....	106
Figura 84. Esquema de placa intermedia con tacos químicos .....	106
Figura 85. Esquema de fijación mediante tacos .....	106

Figura 86. Esquema de la cimentación de la grúa pescante .....	108
Figura 87. Perforación para anclaje de grúa pescante .....	111
Figura 88. Ubicación de pernos y placa para anclaje de grúa pescante .....	111
Figura 89. Vaciado cemento gris y SIKADUR 32 para anclaje .....	112
Figura 90. Montaje final de la grúa.....	113
Figura 91. Grúa con alargadera .....	113
Figura 92. Gancho de izaje deformado .....	121
Figura 93. Gancho de izaje desgastado .....	121
Figura 94. Gancho de izaje sin bloqueo.....	122
Figura 95. Gancho de izaje con fisura .....	122

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Matriz de decisión .....	34
Tabla 2. Cargas en la sección de análisis tubo .....	43
Tabla 3. Cargas en la sección de análisis viga .....	53
Tabla 4. Variables necesarias para cálculo de excentricidad .....	66
Tabla 5. Resumen de cargas que actúan en la sección transversal del tubo .....	71
Tabla 6. Resumen de cargas que actúan en la sección transversal de la viga .....	74
Tabla 7. Dimensiones de la grúa para modelo CAD .....	78
Tabla 8. Resumen estudio de independencia de malla .....	82
Tabla 9. Resumen de resultados análisis estático .....	85
Tabla 10. Resumen de resultados análisis por fatiga .....	91
Tabla 11. Cotización de materiales para anclaje grúa pescante .....	110
Tabla 12. Frecuencia de las inspecciones operacionales basadas en la clase de servicio .....	115
Tabla 13. Frecuencia de las inspecciones periódicas basadas en la clase de servicio .....	116
Tabla 14. Frecuencia de revisión para mantenimiento correctivo .....	117

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A: Planos de fabricación

ANEXO B: Espectro de carga

ANEXO C: Análisis financiero

## **GLOSARIO**

**ACERO:** aleación de hierro con un contenido aproximado de carbono hasta 2%. el alma del acero reside en su composición química, pues de ella depende sus propiedades con resistencia, ductilidad o soldabilidad.

**ALARGADERA:** bloque de acero SAE 1045 mecanizado, el cual cumple la función de transmitir la potencia del motor hacia los cilindros laminadores. La principal cualidad de estos elementos es que permiten transmitir potencia entre maquinas cuyos ejes se encuentran a diferentes alturas, logrando trabajar con inclinaciones de máximo 10°.

**ALMOHADILLA:** son elementos anti-desgaste hechas de un polímero llamado Polamida 6 que es un termoplástico semicristalino que posee buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al impacto elevadas.

**CHAVETA:** son elementos mecánicos que sirven para la unión de piezas que deben girar solidarias con un árbol para transmitir un par motriz.

**CIMENTACIÓN:** La cimentación es la parte estructural de la grúa, encargada de transmitir las cargas al terreno.

**CIZALLA:** en el proceso de laminación en caliente, es la máquina que corta la barra en una longitud determinada mientras se encuentra en movimiento.

**COJINETES:** elementos mecánicos que se encargan de soportar una carga y permitir el movimiento deslizante o rotativo entre dos elementos en una máquina.

**CONCENTRADOR DE ESFUERZO:** son cambios de flujo de los esfuerzos debido a cambios de geometría en una pieza.

**CORTANTE:** es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico.

**DESBASTE:** es la primera etapa por la que pasa una palanquilla en el proceso de laminación en caliente, en esta etapa sufre la mayor reducción de área transversal.

**DÚCTIL:** es aquel material que, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse sin llegar a romperse.

**EJE NEUTRO:** es el lugar geométrico de los puntos de la sección con tensión normal nula.

**ENGRANAJE:** rueda o cilindro dentado empleado para transmitir un movimiento desde una parte de una máquina a otra.

**EXCENTRICIDAD:** es un parámetro que determina el grado de desviación de una sección cónica con respecto a una circunferencia.

**FATIGA:** es un proceso de degeneración de un material sometido a cargas cíclicas de valores por debajo de aquellos que serían capaces de provocar su rotura mediante tracción.

**MECANIZADO:** es el conjunto de operaciones que, partiendo de una pieza en bruto, y eliminando o arrancando parte del material que la compone se obtiene una pieza de la forma y dimensiones deseadas. Por lo tanto, en este tipo de proceso, por definición, no se produce aporte de material, ni se le da forma por doblado, ni estiramiento.

**MOMENTO DE INERCIA:** es una medida de la inercia rotacional de un cuerpo. Cuando un cuerpo gira en torno a uno de los ejes principales de inercia, la inercia rotacional puede ser representada como una magnitud vectorial.

**PANDEO:** es un tipo particular de esfuerzo relacionado con la compresión en elementos muy largos en relación con su sección transversal.

**PÉNDULO:** es un sistema físico que puede oscilar bajo la acción gravitatoria, está configurado por una masa suspendida de un punto o de un eje horizontal fijos mediante un hilo, una varilla, u otro dispositivo.

**POLIPASTO:** es una máquina compuesta por dos o más poleas y una cuerda, cable o cadena. Permite levantar una carga ejerciendo una fuerza menor al peso que hay que desplazar.

**POLÍMERO:** son las macromoléculas formadas por unión de unidades fundamentales que se repiten en una cadena llamadas monómeros. El gran número de monómeros que componen un polímero confieren a la sustancia un elevado peso molecular.

**POTENCIA:** la rapidez con la que se realiza un trabajo, es decir trabajo realizado por un sistema en la unidad de tiempo.

**PONDERACIÓN:** es el peso o la relevancia que tiene algo.

**PRODUCTO CRUZ:** es una forma de multiplicar vectores que se realizan en la mayoría de las aplicaciones de física.

**SEMICRISTALINO:** es un polímero que contiene dos regiones claramente definidas en su estado sólido. Una de estas regiones es amorfa y la otra es cristalina.

**TESTERO:** son elementos que realizan la traslación de los puentes grúa, grúas pórtico y semi-pórtico. Cada testero consta de dos ruedas; una de ellas es motriz y la otra va "loca", montadas sobre un tubo cuadrado debidamente mecanizado.

**TRACCIÓN:** un elemento trabaja a tracción, cuando fuerzas con la misma dirección y de sentidos contrarios tienden a estirarlo.

SECCIÓN TRANSVERSAL: proyección de una sección de un objeto que se ha realizado mediante un corte perpendicular al eje largo del mismo.

VIGA EMPOTRADA: es aquella que además de transmitir el esfuerzo cortante, también transmite un esfuerzo de momento en el apoyo.



## LISTA DE NOMENCLATURA, ABREVIACIONES Y SIMBOLOS

$A$	Área
$\alpha$	Ángulo de momento resultante
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
$b$	Ancho de la sección transversal
$\beta$	Ángulo de deformación
$c$	Distancia del eje neutro a la fibra más alejada
CAD	Diseño asistido por computador
CAE	Ingeniería asistida por computador
$C_c$	Límite de la relación de esbeltez
cm	Centímetro
$d_e$	Diámetro exterior
$d_i$	Diámetro interior
$\delta$	Deformación
$\rho$	Densidad
$e$	Excentricidad
$E$	Modulo de Young
$F$	Fuerza
$F'$	Fuerzas de impacto
$FS$	Factor de seguridad excentricidad
FEM	Asociación española de manutención
$h$	Altura de la sección transversal
$i, j, k$	Vectores unitarios en producto cruz
$I$	Momento de inercia
IPE	Producto laminado con una sección en forma de doble T, también llamada perfil I

$J$	Momento polar de inercia
$K$	Factor de corrección resistencia fatiga
kgf	Kilogramo fuerza
$L_e$	Longitud equivalente
$M$	Momento
$M'$	Momento de impacto
$M_r$	Momento flector resultante
$m$	Masa
MPa	MegaPascal
m	Metro
mm	Milímetro
MOTS	Método operativo de trabajo seguro
N	Newton
$N$	Factor de seguridad
Pa	Pascal
$Q$	Primer momento de área
$R$	Reacción
$r$	Radio de desplazamiento de fuerza
$r_x$	Radio de giro
$S$	Esfuerzo
$S_{ax}$	Esfuerzo por fuerza axial
$S_a$	Esfuerzo alterno
$S_c$	Esfuerzo por fuerza cortante
$S_f$	Esfuerzo por momento flector
$S_m$	Esfuerzo medio
$S_n$	Resistencia a la fatiga corregida
$S_s$	Esfuerzo cortante
$S_t$	Esfuerzo por momento torsor

$S_u$	Resistencia ultima
$S_y$	Resistencia de fluencia
$S_{ys}$	Resistencia de fluencia a cortante
$\sigma$	Esfuerzo equivalente de Von Mises
$T$	Momento torsor
$\tau$	Esfuerzo cortante equivalente de Von Mises
TECO	Teoría del esfuerzo cortante octaédrico
TECM	Teoría del esfuerzo cortante máximo
$\theta$	Ángulo de péndulo
$v$	Volumen

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la industria siderúrgica, el manejo de cargas con elementos de izaje, es primordial para la optimización del proceso de laminación. Con estos elementos se manipulan materias primas, repuestos, maquinaria, subproductos y productos terminados de manera segura. Es necesario lograr plantear una solución para levantar los elementos que acoplan, las cajas de laminación con los reductores y facilitar el cambio de los elementos de desgaste que se usan en esta aplicación; de tal forma que no se tenga interferencia con los tres puentes grúas ubicados en el tren de laminación.

Por este motivo se vio como opción principal el diseño de una grúa pescante o columna giratoria, este tipo de grúa permite una cobertura total de las dos cajas de laminación en las que se planea usar. Al componerse básicamente de un brazo giratorio solidario a una columna que se articula verticalmente en los extremos superior e inferior, es una solución sencilla y efectiva para la limitación de espacio.

Las grúas giratorias de columna giratoria son una aplicación diseñada principalmente para manejar cargas en un puesto de trabajo; es decir suplen el izaje de cargas muy frecuentes en un radio de trabajo reducido (siendo su alcance máximo 6 m). Su capacidad de giro es de 270° con una carga de hasta 6 toneladas.

Al tener una grúa fija que no interviene con la operación de los puentes grúas de la nave, se aumenta el tiempo disponible para el proceso de laminación, esto reduce los costos de operación, optimiza las paradas de mantenimiento programado y reduce la mano de obra que interviene durante los cambios de elementos de desgaste. Esto representa para la empresa un ahorro de COP \$10.000.000 si se disminuye en una hora los cambios de elementos de desgaste.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el tren de laminación de Ternium Siderúrgica de Caldas, se utilizan cajas de rodillos acopladas al reductor del motor por medio de elementos conocidos como alargaderas. Estos elementos permiten la transmisión de potencia con inclinaciones hasta de 10° entre el acople del rodillo y el acople del reductor, donde se utiliza un elemento de desgaste llamado almohadilla, para evitar la fricción entre las alargaderas y los acoples. Para el cambio de las almohadillas es necesario levantar la alargadera, introducir la almohadilla y volver a ajustar la alargadera al acople por medio de un pasador, este proceso de cambio de almohadillas puede durar aproximadamente 10 minutos. En el área de producción se tienen siete cajas laminadoras, en las cuales se debe realizar este cambio, lo cual genera gran tiempo consumido en interrupciones en la línea y aumenta los costos de producción.

Para el tren de laminación, una hora de parada puede costar alrededor de COP \$10.000.000, contando mano de obra de operarios y costos de energía en el protocolo de arranque de la producción. Estas interrupciones generadas por el cambio de almohadillas y la limitada disponibilidad de los dos puentes grúa existentes en el tren de laminación aumentan este sobre costo.

Por lo tanto, se considera necesario el estudio y la revisión de los diseños de grúas plumas o de brazo giratorio, con el propósito de plantear un nuevo diseño de grúa que represente soluciones en el aspecto económico y que permitan aumentar el tiempo neto de producción del tren de laminación.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

El presente proyecto tiene como fin desarrollar una máquina que esté acorde al proceso de cambio de almohadillas que se realiza en el tren de laminación de Ternium Siderúrgica de Caldas, identificando partes críticas de la misma y mejorando su aplicabilidad para brindar una solución a la problemática que actualmente se presenta en el tren de laminación.

Dentro del proceso de práctica profesional se realizó la identificación del problema y la concepción previa del diseño de la máquina, gracias a la posibilidad brindada por Ternium Siderúrgica de Caldas, quien pretende involucrar de manera activa los procesos académicos e industriales en las problemáticas reales de los procesos productivos, lo cual brinda una posible solución a la problemática ya planteada. Lo anterior asegura un aporte significativo en la industria local, ya que el diseño de la grúa está enfocado principalmente en mejorar la productividad y ahorrar costos por paradas innecesarias a la empresa. Lo anterior busca fortalecer la relación académica y empresarial que se quiere afianzar por medio de lazos de cooperación interinstitucionales.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo general**

Diseñar un sistema de elevación tipo grúa Pescante, que permita mejorar las condiciones de producción durante el proceso de cambio de almohadillas en las cajas de laminación.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Describir la necesidad que tiene la línea de producción y los aspectos técnicos para los cuales se requiere el diseño.
- Aplicar vigilancia estratégica y observación para definir una alternativa tecnológica que se ajuste a las necesidades planteadas.
- Diseñar el sistema de elevación con las especificaciones de diseño identificadas en el análisis de la línea productiva y en el proceso de vigilancia estratégica.
- Validar el sistema diseñado por medio de herramientas computacionales que garantice el correcto funcionamiento del sistema de elevación.
- Generar la documentación necesaria como memorias de cálculo y planos del diseño, con el fin de obtener la información técnica necesaria para el proceso de fabricación.

### **1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO**

Después de conocer las necesidades del proceso, en el capítulo 2 se hará una clasificación de las mismas y a partir de allí se empezará a desarrollar el concepto de la máquina a construir, realizando los cálculos pertinentes de ingeniería y las validaciones según teorías aplicables. Finalmente se determinarán las dimensiones y especificaciones propias del diseño y al final se hará la validación de este en campo, es decir, durante esta etapa se realizarán dos visitas para asegurar el correcto dimensionamiento del diseño.

A partir del diseño obtenido, en el capítulo 3 se obtendría la respectiva cotización de presupuesto, finalizará con la construcción del modelo CAD del sistema, elaboración de las memorias de cálculo y la generación de la información técnica y planos constructivos útiles para el proceso de fabricación.

En el capítulo 4 después de realizar el prototipo CAD de la máquina diseñada, se puede proceder a la simulación para analizar los posibles problemas en su funcionamiento mecánico, con ayuda de diferentes herramientas computacionales y conceptos de personas con experiencia en el tema.

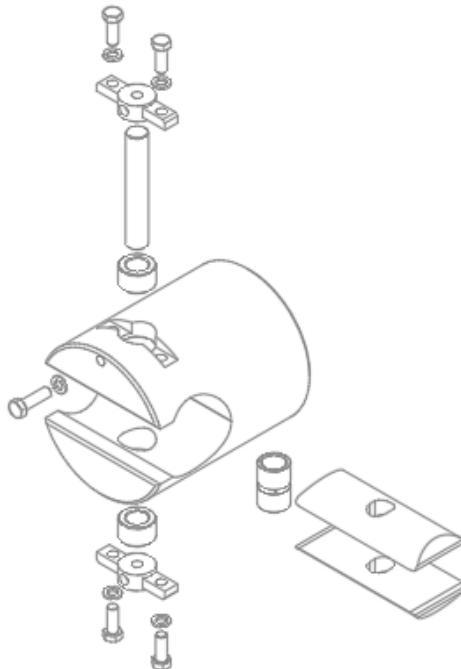
Y en el capítulo 5, a partir de los resultados de la simulación, se tomarán decisiones para replantear las consideraciones tomadas en el proceso de diseño y el desarrollo de la máquina. Esto se complementará con dos visitas de vigilancia al proceso de fabricación e instalación, donde se pueden detectar posibles problemas. De la misma forma se estudiará su funcionamiento respecto a las consideraciones iniciales planteadas y proponer las acciones de mejora necesarias.

## 2. RECONOCIMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se presenta la información inicial con la que se cuenta para la solución del problema, es decir, la necesidad de la empresa y las posibles soluciones. Se muestra el proceso de selección de la tecnología de elevación de cargas por medio de vigilancia estratégica y los requerimientos que esta debe cumplir.

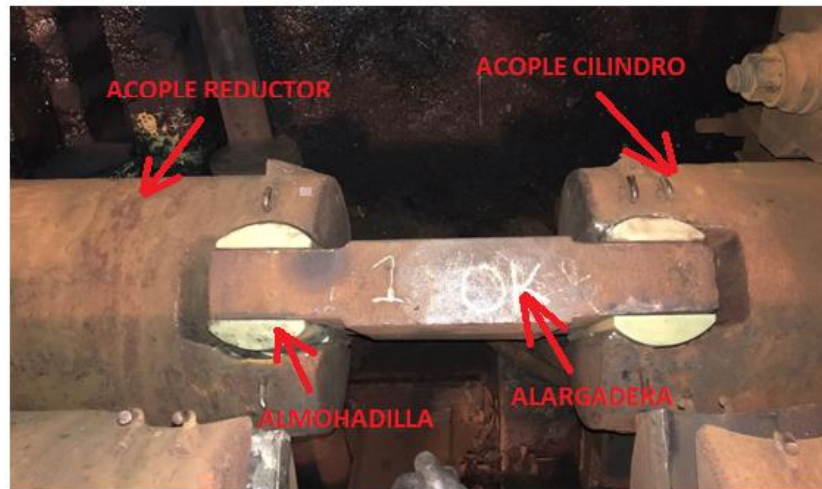
Como se muestra en las figuras 1 y 2, en cada caja laminadora del tren de laminación uno existen acoples entre el reductor y los cilindros de laminación donde se ubican una alargadera y sus respectivas almohadillas entre las palmas, luego se posiciona un buje de poliamida y un pasador de acero; todo el conjunto se asegura con una chaveta que va atornillada al acople. Cada caja laminadora posee dos alargaderas y cuatro almohadillas, un par para el acople en el eje del reductor y otro par para el muñón del cilindro de laminación. Así pues, la empresa requiere un dispositivo para elevar las alargaderas de su posición y permitir el cambio de las almohadillas por lo menos dos veces por turno de trabajo.

Figura 1. Ensamble de acople y almohadillas



Fuente: Archivo Ternium Siderúrgica de Caldas [1]

Figura 2. Ubicación de las almohadillas entre el acople y la alargadera



Fuente: Autores

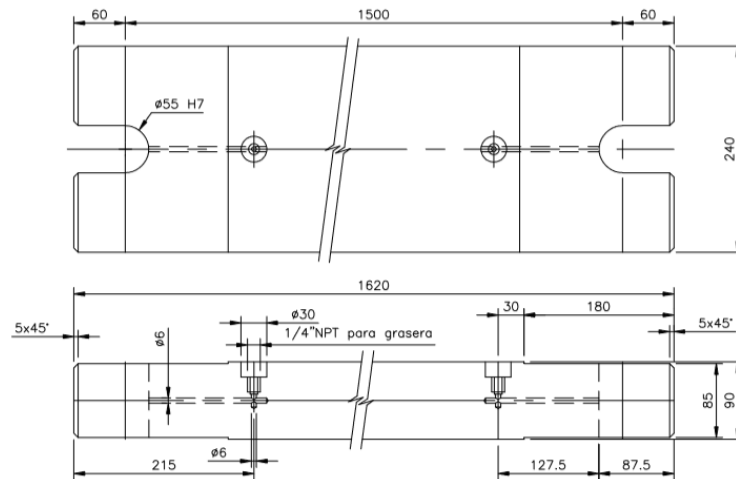
## 2.1. ELEMENTOS PARA INTERVENIR

### 2.1.1. Alargaderas

Es un bloque de acero SAE 1045 mecanizado, el cual cumple la función de transmitir la potencia del motor hacia los cilindros laminadores. La principal cualidad de estos elementos es que permiten transmitir potencia entre maquinas cuyos ejes se encuentran a diferentes alturas, logrando trabajar con inclinaciones de máximo  $10^\circ$  (aunque no es recomendable para evitar sobreesfuerzos en los elementos del reductor). Las almohadillas se ubican en los extremos de las alargaderas para evitar el contacto metal con metal y disminuir el desgaste de las piezas por las sobrecargas que manejan y sus dimensiones se muestran en la figura 3. La función de la grúa es el levantamiento de una alargadera en cada procedimiento con un peso aproximado de 300 kgf siendo esta su carga máxima.



Figura 3. Esquema dimensional de las alargaderas



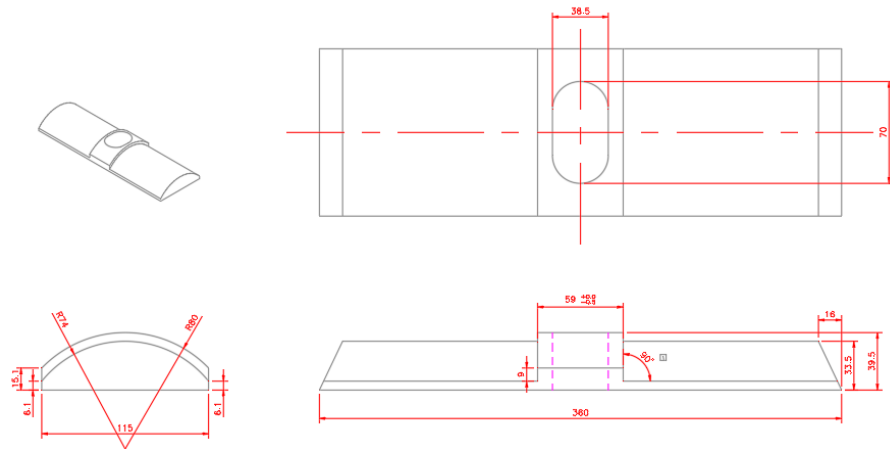
Fuente: Archivo Ternium Siderúrgica de Caldas [2]

### 2.1.2. Almohadillas

Las almohadillas son elementos anti-desgaste hechas de un polímero llamado Poliamida 6 definido como un termoplástico semicristalino que posee buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al impacto elevadas, buen comportamiento al deslizamiento, mejorándolo con el agregado de  $\text{MoS}_2$  (Disulfuro de Molibdeno), también posee buena resistencia al desgaste; por ello es apropiado como plástico de ingeniería de uso universal, en construcciones mecánicas y trabajos de mantenimiento industrial. Su elasticidad permite la absorción de las vibraciones o impactos, por lo que en los cojinetes y engranajes trabajan de forma silenciosa. Tiene un punto de reblandecimiento alto y un óptimo comportamiento frente a los agentes atmosféricos.

La poliamida 6 se comercializa bajo diferentes nombres como Nylon, Grilon, Durethan B, Nylatrom, entre otros [3]. Las medidas especificadas para la construcción de las almohadillas se muestran en la siguiente figura 4.

Figura 4. Esquema de almohadillas



Fuente: Archivo Ternium Siderúrgica de Caldas [4]

Este elemento se ubica entre el acople y las alargaderas asegurándose con un pasador y un buje de este mismo material. Las almohadillas evitan la fricción entre el acople y la alargadera.

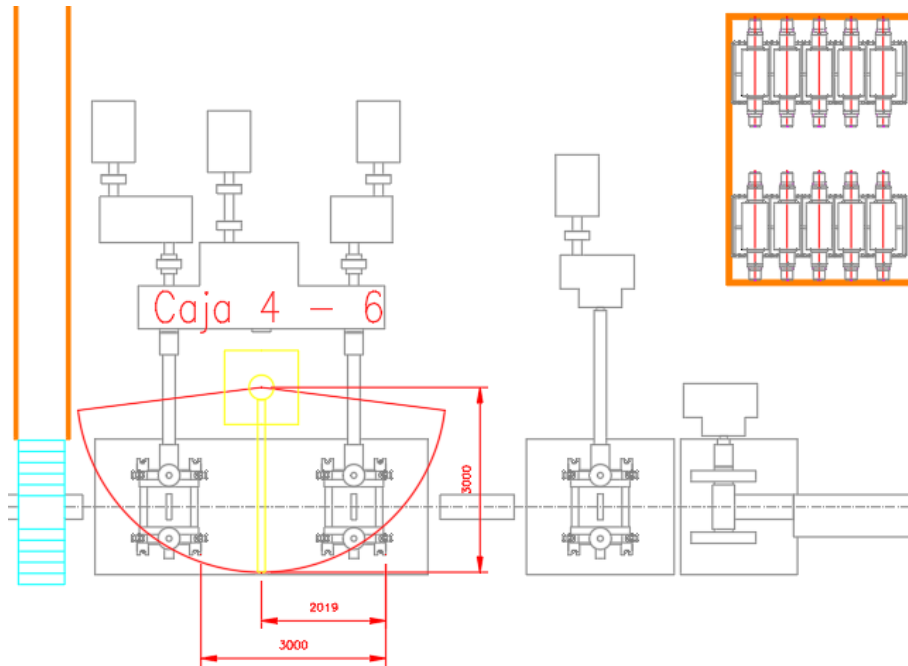
## 2.2. DEFINICIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO

El tren de laminación uno se encuentra dividido en las zonas de desbaste, tren continuo, mesa de enfriamiento, enderezado y empaque y bodega de producto terminado. El área de interés es el tren continuo mostrado en la figura 5, compuesto de cinco cajas de laminación (caja 3A, 3, 4, 6 y 7) y una cizalla que corta la barra laminada en tramos de 12 m o 18 m.

La grúa estará ubicada entre las cajas 4 y 6, ya que son las cajas que más espacio poseen entre ellas, y en montajes permitiría disponibilidad del puente grúa para trabajos alternos en las demás cajas y el desbaste.

Las cajas 4 y 6 funcionan con el mismo reductor y por esto se encuentran a la misma distancia. La grúa servirá de apoyo para el cambio de almohadillas en las dos alargaderas que posee cada caja laminadora.

Figura 5. Esquema de trabajo en el tren continuo



Fuente: Archivo Ternium Siderúrgica de Caldas [5]

## 2.3. TIPOS DE GRÚAS

Se realiza un análisis de las características de los principales tipos de grúas usadas en la industria como parte del proceso de vigilancia estratégica, para luego analizar sus ventajas e inconvenientes, y seleccionar la opción más adecuada para el problema planteado.

### 2.3.1. Puente grúa monorriel

Los puentes grúas monorriel, están conformados básicamente por una sola viga – carga, lo cual los convierte en una configuración simple y ligera. Este tipo de grúa es ampliamente utilizado en diversos lugares tales como fábrica, nave, taller y almacén para elevar y trasladar las cargas. La capacidad de carga puede alcanzar 196 kN y luces hasta 28,5 m. Su accionamiento puede ser manual o eléctrico.

Cuando su accionamiento es eléctrico este tipo de grúas cuentan con doble velocidad en sus movimientos (elevación, traslación del carro y traslación del puente) y pueden venir equipados con polipastos [6]. Ver figura 6.

Figura 6. Puente grúa monorriel



Fuente: A.K.B.V. [7]

### 2.3.2. Puente grúa birriel

Este puente grúa consta de doble viga principal, en esta se apoya el carro que sustenta al polipasto y permite alcanzar la máxima altura del gancho. Esta grúa es una opción ideal para transportar cargas pesadas debido a que tienen una capacidad de hasta 2900 kN. La configuración de dos vigas puede asegurar la estabilidad de equipo. Por eso, su capacidad de carga es más grande que la de puente grúa monorriel [6]. Ver figura 7.

Figura 7. Puente grúa birriel



Fuente: Universidad de Salamanca [8]

### 2.3.3. Grúa giratoria de columna giratoria (pescante)

Este tipo de grúa se compone básicamente de un brazo giratorio solidario a una columna. El brazo se articula verticalmente en los extremos superior e inferior. Las grúas giratorias de columna giratoria son una aplicación diseñada principalmente para manejar cargas en un puesto de trabajo; es decir suplen el izaje de cargas muy frecuentes en un radio de trabajo reducido (siendo su alcance máximo 6 m). Su capacidad de giro es de 270° con una carga de hasta 59 kN.

Son adaptables a diferentes modos de fijación, según las condiciones de las estructuras o facilidades físicas del proceso, pueden ser utilizados en compañía de un polipasto de cadena manuales o eléctricos [9]. Ver figura 8.

Figura 8. Grúa giratoria de columna giratoria



Fuente: HANSECOL [10]

### 2.3.4. Grúa giratoria de columna fija

La característica principal de este tipo de grúas es una columna fija a una cimentación, sobre esta hay un mecanismo de giro que pivota un brazo. Esta configuración permite una rotación de la pluma de 360° con capacidad de carga de hasta 200 kN y un brazo de 8 m. Estas grúas no requieren ningún tipo de soporte adicional, sino una cimentación permanente de un tamaño adecuado [9]. Ver figura 9.

Figura 9. Grúa giratoria de columna fija



Fuente: WEIHUA GRÚA [11]

### 2.3.5. Grúa pórtico

La grúa pórtico es un equipo de elevación cuyo elemento portador se apoya sobre un camino de rodadura por medio de patas de apoyo. Se utiliza en diferentes ocasiones de trabajo, tales como puerto de contenedores, muelle, patio de materiales, fábrica, naves, talleres, etc. Una grúa pórtico se compone principalmente de viga de carga, patas de apoyo, testeros, sistema de control eléctrico, mecanismo de elevación, mecanismo de movimiento de grúa, entre otros [12]. Ver figura 10.

Figura 10. Grúa pórtico



Fuente: DGCRANE [13]

#### 2.3.6. Grúa semipórtico

Este tipo de grúa se diferencia con la grúa pórtico porque uno de sus caminos de maniobra permanece unido a rieles, mientras que el otro se mueve con ruedas. Éste último es el punto de apoyo que permanece en el suelo. Los otros dos están elevados sobre pilares o columnas. Las grúas semipórtico pueden emplearse tanto para trabajos en el interior como a la intemperie y permiten el movimiento de cargas en todo tipo de industrias y aplicaciones [12]. Ver figura 11.

Figura 11. Grúa semipórtico



Fuente: DGCRANE [14]

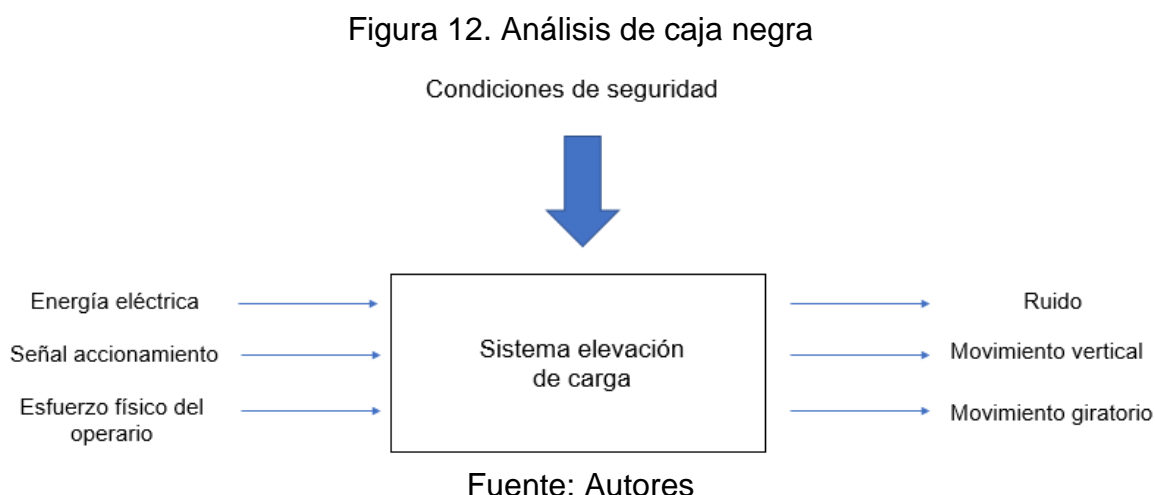
## 2.4. ANÁLISIS DE CAJA NEGRA

La grúa será diseñada para levantar las alargaderas de los reductores de las cajas laminadoras, por lo tanto, su función principal es sostener la carga mientras la desplaza, un movimiento de dos grados de libertad. Para realizar su función, la grúa contará con un sistema de alimentación de energía eléctrica que alimenta el motor que desplaza de manera vertical el gancho donde se sujetan las alargaderas (polipasto), y de manera manual se genera el movimiento de rotación sobre el propio eje de la grúa.

Además, debe contar con una señal que acciona el sistema de levante, lo que sería la orden del supervisor de producción, indicando que es tiempo de hacer el cambio de las almohadillas o el cumplimiento de un periodo de uso de estas. Finalmente, el equipo necesitará una persona que realice la operación de este, ya que no se trata de una grúa automática.

Los factores mencionados anteriormente, se pueden ver afectados por un entorno definido como condiciones de seguridad ya que, de no cumplirse con estas, el proceso que realiza la grúa podría ser peligroso e incluso detener el proceso de producción.

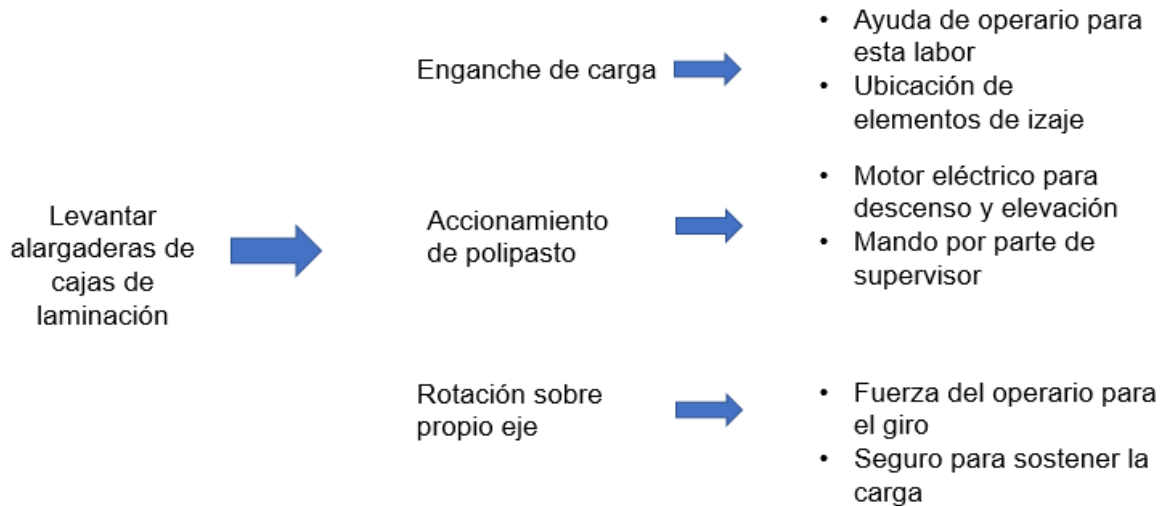
Como salidas del sistema se espera que la grúa realice movimientos verticales y rotatorios, mencionados anteriormente, para reubicar las alargaderas mientras se hace el cambio de almohadillas respectivo y, por efecto de su propio funcionamiento y diseño, se cuenta con producción de ruido y vibraciones. Todo lo anterior se puede resumir como en la figura 12 siguiente.





Durante la operación de la grúa, esta realizará levantamientos que se pueden simplificar como se muestra en el árbol de funciones de la figura 13. Dicho proceso es simple y no necesita de otras máquinas o condiciones externas para realizarse.

Figura 13. Árbol de funciones



Fuente: Autores

#### 2.4.1. Matriz de decisión

Con base en lo planteado anteriormente, se debe realizar una elección del tipo de grúa que se desea construir y dar solución a la necesidad de la empresa. Por lo tanto, se construye una matriz de decisión (tabla 1) donde se plantean las opciones de grúa seleccionados desde el proceso de vigilancia estratégica y las características principales de diseño que se espera obtener del dispositivo.

Una matriz de decisión se basa en dar puntuación a cada opción de acuerdo con el cumplimiento que tiene para una característica en particular. En este caso la puntuación menor es cero (0) y representa la condición de no cumplimiento con la especificación, y la puntuación mayor es diez (10) significa que el requerimiento se cumple totalmente. De acuerdo con la ponderación de importancia para cada característica de diseño, se realiza la siguiente operación para obtener el puntaje total de cada opción de grúa incluida en la matriz [15].

$$\text{Puntaje total} = \sum_{1}^n (\text{Puntuación} \cdot \text{Ponderación}) \quad (1)$$

Tabla 1. Matriz de decisión

TIPOS DE GRÚAS	CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO					
	Peso (300 kgf)	Rotación sobre propio eje	Bajo costo de fabricación e instalación	Distancia vertical (menor a puentes grúa existentes)	Distancia horizontal (aprox. 3 m)	Total puntaje
	10%	30%	20%	30%	10%	100%
Puente grúa monorriel	10	0	4	5	10	4,3
Puente grúa birriel	10	0	2	5	10	3,9
Grúa giratoria de columna giratoria (pescante)	10	10	9	10	10	9,8
Grúa giratoria de columna fija	10	10	6	8	10	8,6
Grúa pórtico	10	0	4	5	10	4,3
Grúa semipórtico	10	0	2	5	10	3,9

Fuente: Autores

El puntaje máximo determina cual es la mejor opción y la más viable para la solución del problema. Como se observa en la tabla, construir una grúa giratoria de columna giratoria (pescante) asegura en un alto porcentaje que el problema puede ser resuelto de manera correcta.

En los siguientes capítulos se desarrolla el proceso de diseño para que la grúa cumpla con los requerimientos de diseño y operación requeridos en su funcionamiento.

### **3. DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA GRÚA**

Dentro de este capítulo se desarrollará el proceso de diseño de la grúa giratoria de columna giratoria con sus respectivos factores de seguridad. Se tomarán decisiones respecto a los elementos que la componen y demás factores de funcionamiento.

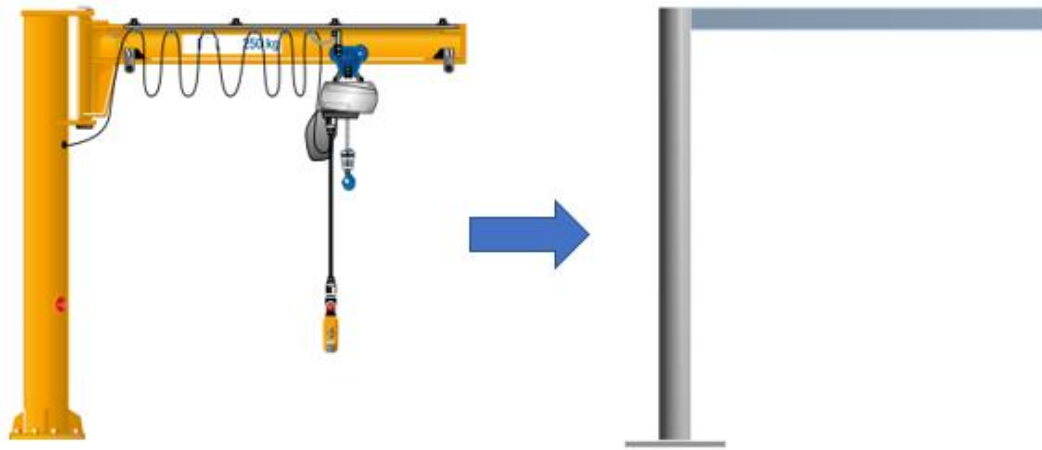
#### **3.1. PARTES DE UNA GRÚA PESCANTE**

Como se muestra a continuación, las partes más importantes de una grúa son [16]:

- Base: parte en la que va anclada la grúa al piso, debe definirse antes de empezar la instalación del equipo y realizar algunas adecuaciones al piso.
- Columna: determina la altura de la grúa y es la encargada de mantenerla en pie. Realiza el esfuerzo de flexión al poner en funcionamiento el equipo
- Mecanismo de rotación: encargado de hacer girar el brazo que fue diseñado para tal fin. Está compuesto por dos rodamientos y un eje que gira cuando el operario empuja de manera suave
- Soporte de brazo: evita que este por el peso dañe la columna y por consiguiente se presenten problemas en la estabilidad de la grúa
- Brazo giratorio: sostiene el mecanismo de elevación y determina el alcance horizontal de la grúa, realiza esfuerzo de flexión cuando el equipo está en funcionamiento
- Polipasto eléctrico: es el encargado del enganche y elevación de la carga, debe ser accionado cuando la grúa esté ubicada justo encima de la carga.
- Tope para polipasto: evita que el polipasto, al ser ubicado encima de la carga, se desacomode o sea ubicado más allá de la zona permitida, poniendo en riesgo la seguridad y eficiencia de la grúa.

Para la realización de este proyecto, se elaboró una simplificación de la estructura a analizar debido a que se quiere hacer un diseño conservador y el modelo mostrado en la parte derecha de la figura 14 así lo evidencia. Los elementos de la conexión soportan un porcentaje de la carga lo que hace que sea menos el esfuerzo en los puntos críticos aquí obtenidos. La columna y la viga se analizarán de manera independiente debido a la configuración simplificada ya mencionada

Figura 14. Simplificación de estructura



Fuente: Autores

### 3.2. CONSIDERACIONES DE OPERACIÓN

#### 3.2.1. Definición de la carga

La carga de trabajo definida para la grúa pescante será el peso de las alargaderas de las cajas 4 y 6 del tren de laminación; el peso propio de las partes de la grúa será despreciado en los cálculos ya que se espera que represente entre el 10 % y 15 % de la carga de las alargaderas, lo que no sería tan crítico para el diseño. Se tratará la alargadera como un bloque de acero SAE 1045 de densidad  $\rho = 7850 \frac{kgf}{m^3}$ , sus dimensiones principales son 1620 mm x 240 mm x 90 mm para la caja 4 y 1655 mm x 240 mm x 80 mm para la caja 6, se trabajará con estas últimas medidas ya que se realizan más cambios de alargaderas a la caja 6 en comparación con las demás cajas. Con estas condiciones su masa sería:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

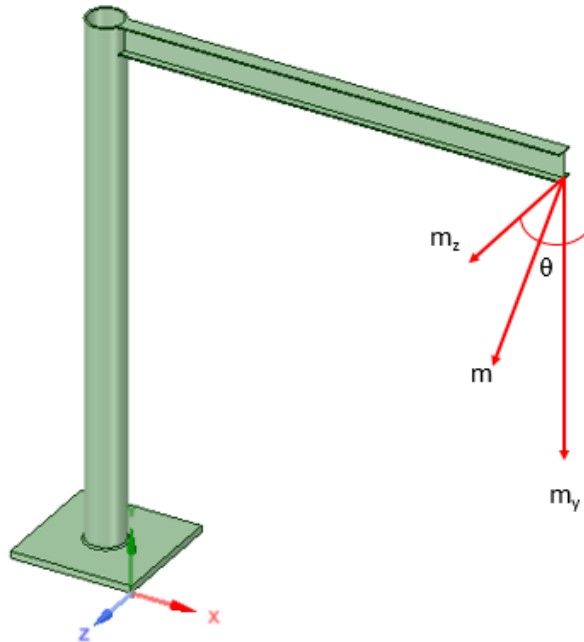
$$m = \rho \cdot v$$

$$m = 7850 \frac{kgf}{m^3} (1,655 m \cdot 0,24 m \cdot 0,08 m)$$

$$m = 249,4 kgf = 2445,77 N$$

Como condición de seguridad, se asumirá en el proceso de diseño un movimiento de péndulo de la carga que puede existir al momento de la elevación de las alargaderas, con un ángulo máximo  $\theta = 7^\circ$ . Así pues, la carga queda distribuida como se muestra en la figura 15.

Figura 15. Carga de la grúa



Fuente: Autores

Para determinar el valor de la carga en cada eje, se descompone trigonométricamente así:

$$m_z = m \cdot \cos(90^\circ - 7^\circ) \quad (3)$$

$$m_y = m \cdot \sin(90^\circ - 7^\circ) \quad (4)$$

$$m_z = 298,02 \text{ N}, \quad m_y = 2427,53 \text{ N}$$

### **3.2.2. Factor de seguridad**

Como norma adquirida por la empresa Ternium Siderúrgica de Caldas, las estructuras que sean puestas en funcionamiento dentro de sus instalaciones deben tener un factor de seguridad cercano a cinco en todos los análisis realizados ya que es necesario mantener la integridad del personal que trabaja en la planta, así como el proceso que se desarrolla dentro de ella [17], igualmente se busca que el diseño sea conservador por estas razones. De acuerdo con el Real Decreto 1435/1992 emitido por el Instituto de seguridad e higiene en el trabajo [18], el factor de seguridad para este tipo de aplicaciones debe ser mayor a 1,5.

### **3.2.3. Material**

Los materiales con los que se construirá la grúa son aceros de alta resistencia. La columna sobre que se encargará de mantener la grúa en pie puede ser construida con tubería cedula 80 de acero ASTM A500 diámetro 8 pulgadas, ya que hay una gran existencia de esta en el almacén de la empresa. Después de realizar los cálculos de resistencia, se puede definir si es apta o no para la aplicación. La viga será cotizada, dependiendo del perfil que le seleccione para el diseño de la grúa, inicialmente los cálculos serán realizados con una viga IPE 160 hecha en acero ASTM A572 grado 50, con el fin de ajustar el diseño a las condiciones de operación del sistema a medida que se obtienen los resultados del proceso de diseño.

### **3.2.4. Dimensiones establecidas y velocidad de trabajo**

Las dimensiones con las que se cuenta, por espacio y facilidad de uso de la grúa son:

- Altura de columna: 3 metros
- Largo del brazo: 2,65 metros

La altura de la grúa está limitada por el espacio que necesitan los puente grúa para desplazarse con cargas suspendidas y el largo del brazo es la distancia entre alargaderas, que se muestra en la figura 5. La velocidad a la que la grúa levantará la carga dependerá del polipasto que será instalado en la viga.

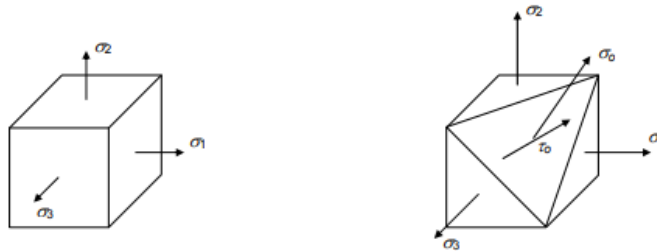
### 3.3. ANÁLISIS DEL DISEÑO POR CARGA ESTÁTICA

Según la teoría de falla estática (en este trabajo se trabajará con la teoría del esfuerzo cortante octaédrico (TECO)), una estructura falla de manera estática cuando el esfuerzo cortante octaédrico excede el valor de este mismo esfuerzo, en una probeta sometida a tracción cuando el esfuerzo normal es igual a la resistencia. Construyendo la ecuación es [19]:

$$\tau_0 \geq \tau_{0p} \text{ cuando } \sigma = S_y \quad (5)$$

El esfuerzo octaédrico  $\tau_0$  está definido como el esfuerzo que se genera en el plano que forma ángulos iguales con los tres planos principales, existe el esfuerzo normal octaédrico y el esfuerzo cortante octaédrico, como se muestra en la figura 16.

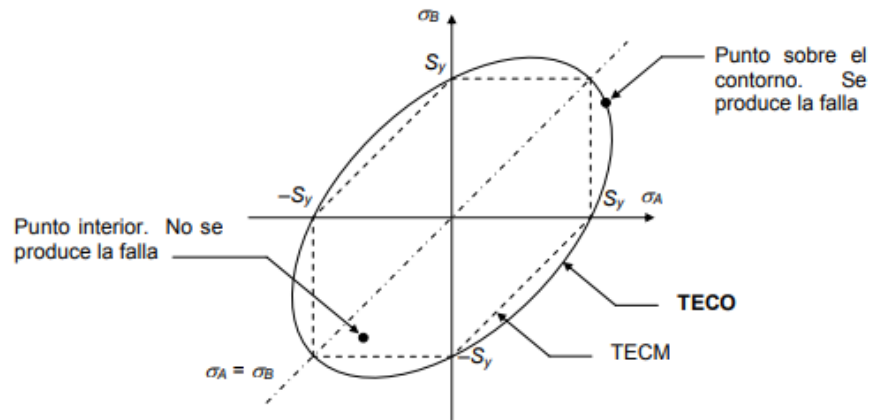
Figura 16. Plano donde ocurren los esfuerzos octaédricos



Fuente: Diseño de elementos de máquinas [19]

En la elipse mostrada en la figura 17 se muestra el comportamiento de los esfuerzos con la teoría, los puntos interiores indican condiciones de no falla.

Figura 17. Teorías de falla estática



Fuente: Diseño de elementos de máquinas [19]

De acuerdo con la TECO, la relación entre la resistencia a la torsión y la resistencia a la tracción está dada por:

$$S_{ys} = 0,577S_y \quad (6)$$

Analizando un estado de esfuerzos biaxial con uno de sus esfuerzos normales igual a cero y aplicando la ecuación del enunciado de la teoría (con algún tratamiento matemático), se tiene que:

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{S}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{S_s}{S_{ys}}\right)^2 \quad (7)$$

donde:

$N$  = Factor de seguridad

$S$  = Esfuerzo normal

$S_y$  = Resistencia a la tracción

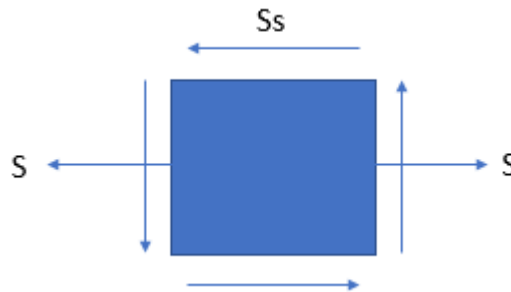
$S_s$  = Esfuerzo cortante

$S_{ys}$  = Resistencia a cortante



Esta forma de la TECO es válida cuando se tiene un estado de esfuerzo en un material dúctil, con esfuerzo cortante y un solo esfuerzo normal en el punto de análisis, mostrado en la figura 18. [19]

Figura 18. Estado de esfuerzo para aplicar TECO



Fuente: Autores

### 3.3.1. Resistencia estática en el tubo

Así pues, para la aplicación se busca un factor de seguridad en la columna que sostiene la estructura, acorde a las políticas de la empresa para sus elementos de izaje. La configuración de análisis se muestra en la figura 19.

Material: acero ASTM A500 [20]

$$S_y = 320 \text{ MPa}$$

$$S_u = 430 \text{ MPa}$$

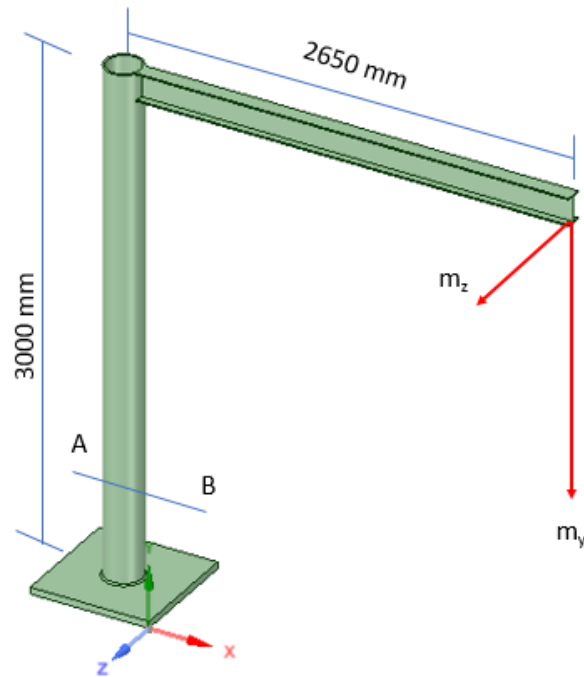
Dimensiones de la tubería: [20]

Diámetro exterior: 219,08 mm

Diámetro interior: 193,68 mm

Espesor: 12,7 mm

Figura 19. Esquema para análisis estático en tubo

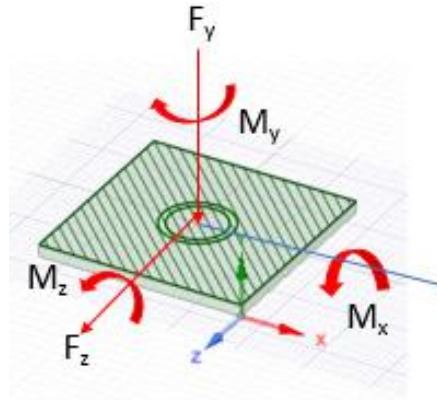


Fuente: Autores

Estado de esfuerzos:

Al trasladar las fuerzas al centro de la sección A-B donde se debe hacer la verificación estática se generan esfuerzos normales y cortantes debido a las cargas que se muestran a continuación. Para no confundir la carga llamada “ $m$ ” con los momentos, a partir de ahora se tomará la nomenclatura como se muestra en la figura 20, la tabla 2 muestra el tipo de esfuerzo que producen las cargas para posterior cálculo:

Figura 20. Distribución de cargas en el tubo



Fuente: Autores

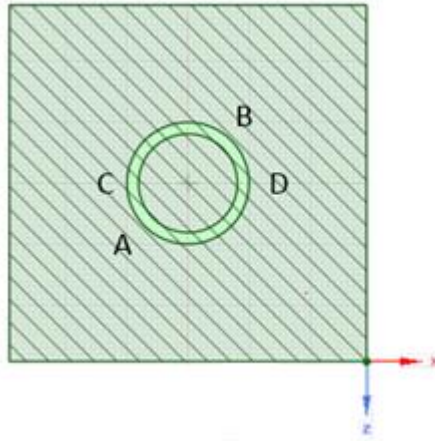
Tabla 2. Cargas en la sección de análisis tubo

CARGA	TIPO DE CARGA	ESFUERZO
$F_y$	Fuerza axial	Normal (S)
$F_z$	Fuerza cortante	Cortante ( $S_s$ )
$M_x$	Momento flector	Normal (S)
$M_y$	Momento torsor	Cortante ( $S_s$ )
$M_z$	Momento flector	Normal (S)

Fuente: Autores

En la figura anterior se puede evidenciar que al trasladar la fuerza en el eje Z se produce un momento flector paralelo al eje X y un momento torsor en dirección del eje Y. La fuerza en el eje Y produce un momento flector en dirección del eje Z. El sentido de los momentos mostrados en la figura son una suposición y los verdaderos signos dependen del producto cruz que se realiza en la sección siguiente, las fuerzas conservan sus sentidos iniciales ( $F_y$  paralela al eje Y negativo y  $F_z$  puede variar de manera alternada en dirección del eje Z positivo y negativo). Debido al análisis de cargas, se determinaron los puntos más críticos de la sección y son mostrados en la figura 21.

Figura 21. Puntos críticos en la sección transversal del tubo



Fuente: Autores

Valores de las cargas:

Las fuerzas  $F_y$  y  $F_z$  conservan sus valores conocidos desde la descomposición de la carga y para el análisis se tomará el sentido positivo de  $F_z$ . Los momentos  $M_x$ ,  $M_y$  y  $M_z$  resultan del producto cruz

$$M = r \times F \quad (8)$$

Donde  $r$  es el vector en los ejes coordenados desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el punto de análisis.

$$M = \begin{array}{ccc} i & j & k \\ -2650 \text{ mm} & -3000 \text{ mm} & 0 \\ 0 & -2427,53 \text{ N} & 298,02 \text{ N} \end{array}$$

$$M = \{(-3000 \text{ mm})(298,02 \text{ N}) - (-2427,53 \text{ N})(0)\}i \\ - \{(-2650 \text{ mm})(298,02 \text{ N}) - 0(0)\}j \\ + \{(-2650 \text{ mm})(-2427,53 \text{ N}) - 0(3000 \text{ mm})\}k$$

$$M = (-893466 \text{ N} \cdot \text{mm}) - (-789228,3 \text{ N} \cdot \text{mm})j + (6428613,8 \text{ N} \cdot \text{mm})k$$

- Esfuerzo debido a fuerza axial  $F_y$

$$S_{ax} = \frac{F_y}{A} \quad (9)$$

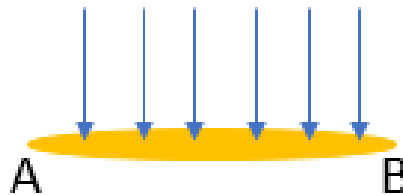
$A$  = Área de la sección transversal

$$S_{ax} = \frac{-2472,53 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} \cdot ((0,219 \text{ m})^2 - (0,193 \text{ m})^2)}$$

$$S_{ax} = -288453,26 \text{ Pa}$$

Distribución del esfuerzo en la sección: Esfuerzo de compresión uniforme, como se evidencia en la figura 22.

Figura 22. Distribución del esfuerzo axial



Fuente: Autores

- Esfuerzo debido a momentos flectores  $M_x$  y  $M_z$

Al presentarse dos esfuerzos flectores se debe hacer una resultante y con esta calcular el esfuerzo a flexión  $M_R$

$$M_R = \sqrt{M_x^2 + M_z^2} \quad (10)$$

$$M_R = \sqrt{(-893466 \text{ N} \cdot \text{mm})^2 + (6428613,8 \text{ N} \cdot \text{mm})^2}$$

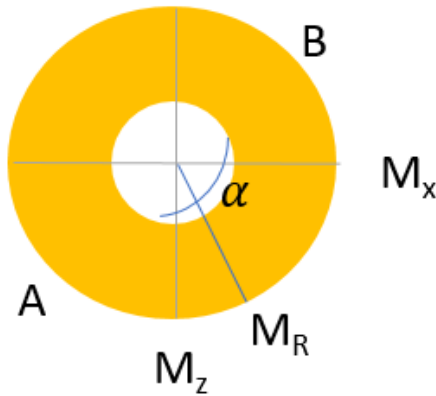
$$M_R = 6490,4 \text{ N.m}$$

La dirección del momento resultante se calcula por medio de la función arco tangente y esta se evidencia en la figura 23.

$$\alpha = \text{ArcTan}\left(\frac{6428613,8 \text{ N.mm}}{-893466 \text{ N.mm}}\right) \quad (11)$$

$$\alpha = -89,3^\circ$$

Figura 23. Dirección del momento resultante



Fuente: Autores

Ahora, el esfuerzo a flexión se calcula:

$$S_f = \pm \frac{M_R c}{I} \quad (12)$$

$c$  = Distancia desde el eje neutro hasta la fibra más alejada

$I$  = Momento de inercia

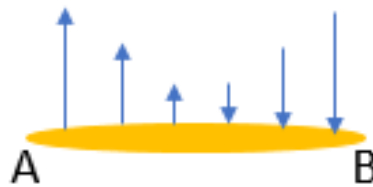
$$c = \frac{d_e}{2} = \frac{0,219 \text{ m}}{2} = 0,1095 \text{ m} \quad (13)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (d_e^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{64} ((0,219 \text{ m})^4 - (0,193)^4 \text{ m}) = 0,0000448 \text{ m}^4 \quad (14)$$

$$S_f = \pm \frac{6490,4 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 0,1095 \text{ m}}{0,0000448 \text{ m}^4} = 15863812,5 \text{ Pa}$$

Distribución de esfuerzos en la sección: Esfuerzo de compresión a la derecha y esfuerzo de tracción a la izquierda, mostrado en la figura 24.

Figura 24. Distribución del esfuerzo flector



Fuente: Autores

Finalmente se calcula el esfuerzo normal en la sección transversal:

$$\text{Punto A: } -S_{ax} + S_f = S \quad (15)$$

$$\text{Punto B: } -S_{ax} - S_f = S \quad \rightarrow \quad \text{Más crítico} \quad (16)$$

$$S = -288453,26 \text{ Pa} - 15861876,13 \text{ Pa}$$

$$S = -16152265,77 \text{ Pa} = \mathbf{-16,15 \text{ MPa}}$$

Este esfuerzo normal es el que soporta la sección en el punto B, siendo un esfuerzo de compresión.

- Esfuerzo debido a fuerza cortante  $F_z$

$$S_c = \frac{F_z \cdot Q}{I \cdot b} \quad (17)$$

$Q$  = Primer momento de área de la sección

$I$  = Momento de inercia

$b$  = Ancho de la sección

$$Q = \frac{\pi d_e^2}{8} \left( \frac{2d_e}{3\pi} \right) - \frac{\pi d_i^2}{8} \left( \frac{2d_i}{3\pi} \right) = \frac{1}{12} (d_e^3 - d_i^3) \quad (18)$$

$$Q = \frac{1}{12} ((0,219 \text{ m})^3 - (0,193 \text{ m})^3) = 0,000276 \text{ m}^3$$

$$b = \frac{d_e}{2} = \frac{0,219 \text{ m}}{2} = 0,1095 \text{ m} \quad (19)$$

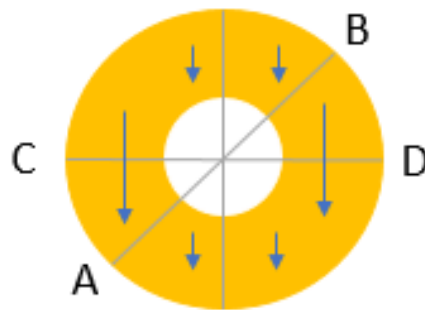
$$I = 0,0000448 \text{ m}^4$$

$$S_c = \frac{(298,02 \text{ N})(0,000276 \text{ m}^3)}{0,0000448 \text{ m}^4 (0,1095 \text{ m})}$$

$$S_c = 16756,13 \text{ Pa}$$

Distribución de esfuerzos en la sección: Máximo a lo largo de la línea C-D, mostrado en la figura 25.

Figura 25. Distribución del esfuerzo cortante



Fuente: Autores

- Esfuerzo debido a momento torsor  $M_y$



$$S_t = \frac{M_y c}{J} \quad (20)$$

$c$  = Distancia desde el centro hasta la fibra más alejada

$J$  = Momento polar de inercia

$$c = \frac{d_e}{2} = \frac{0,219 \text{ m}}{2} = 0,1095 \text{ m} \quad (13)$$

$$J = \frac{\pi}{32} (d_e^4 - d_i^4) \quad (21)$$

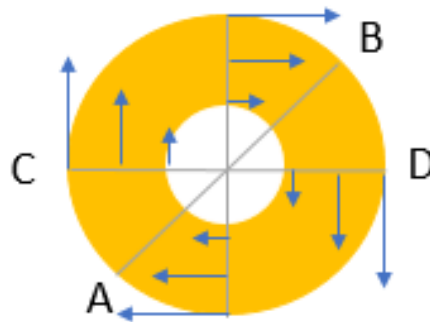
$$J = \frac{\pi}{32} (0,219^4 - 0,193^4) = 0,0000896 \text{ m}^4$$

$$S_t = \frac{(-789228,3 \text{ N} \cdot \text{mm}) \left( \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right) (0,1095 \text{ m})}{0,0000896 \text{ m}^4}$$

$$S_t = 964396,76 \text{ Pa}$$

Distribución de esfuerzos en la sección: Máximo en el perímetro de la sección (puntos A, B, C y D), figura 26.

Figura 26. Distribución del esfuerzo de torsión



Fuente: Autores

Calculando el esfuerzo cortante para la sección:

$$\text{Punto C: } S_c - S_t = S_s \quad (22)$$

$$\text{Punto D: } S_c + S_t = S_s \rightarrow \text{Más crítico} \quad (23)$$

$$S_s = 16756,13 \text{ Pa} + 964396,76 \text{ Pa}$$

$$S_s = 981152,897 \text{ Pa} = \mathbf{0,9811 \text{ MPa}}$$

Esfuerzo cortante máximo que se produce en la sección y ocurre en el punto D, siendo un esfuerzo en la dirección del eje Z.

- Teoría de falla

Se elige el punto B para el análisis ya que soporta el máximo esfuerzo normal (axial y flexión) y el máximo esfuerzo cortante por torsión, haciendo que sea punto crítico dentro de la estructura y el lugar donde podría ocurrir una falla debido a una sobrecarga. Aplicando TECO para este punto:

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{S}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{S_s}{S_{ys}}\right)^2 \quad (7)$$

$$S_{ys} = 0,577S_y \quad (6)$$

$$S_{ys} = 0,577(320 \text{ MPa}) = 184,664 \text{ MPa}$$

$$N^2 = \frac{1}{\left(\frac{S}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{S_s}{S_{ys}}\right)^2} \quad (24)$$

$$N^2 = \frac{1}{\left(\frac{16,15 \text{ MPa}}{320 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{0,9811 \text{ MPa}}{184,64 \text{ MPa}}\right)^2}$$

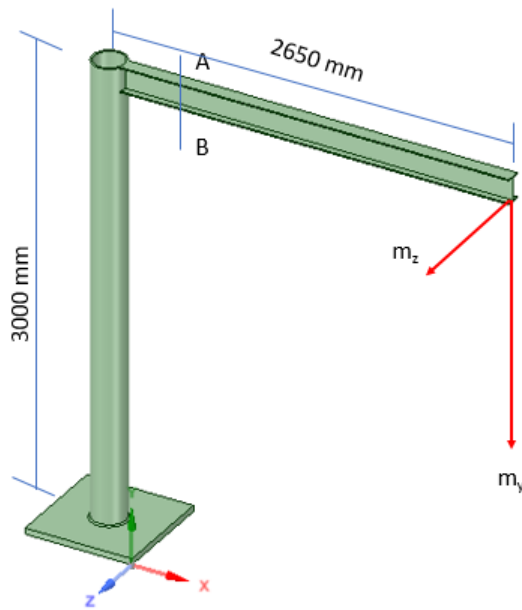
$$\mathbf{N = 19,705}$$

Este factor de seguridad  $N$  es bastante alto ya que, como se mencionó anteriormente, la empresa exige que sea mayor de cinco, siendo este análisis el menos crítico. Por ello es recomendable un valor de  $N$  alto en el análisis estático para cumplir con los requerimientos en las demás situaciones.

### 3.3.2. Resistencia estática en la viga

En la figura 27 se muestra la distribución de las cargas en la grúa, que sería la misma y se debe variar la sección transversal a analizar, igualmente se busca un factor de seguridad que esté acorde a las políticas de la empresa para sus estructuras:

Figura 27. Esquema para análisis estático en viga



Fuente: Autores

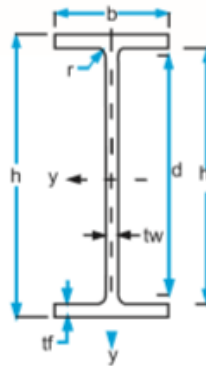
Material: acero ASTM A572 Grado 50 [21]

$$S_y = 345 \text{ MPa}$$

$$S_u = 450 \text{ MPa}$$


Dimensiones del perfil: figuras 28 y 29.

Figura 28. Perfil viga IPE 160



Fuente: Consorcio metalúrgico nacional - COLMENA [21]

Figura 29. Propiedades de la sección IPE 160


**VIGAS IPE**

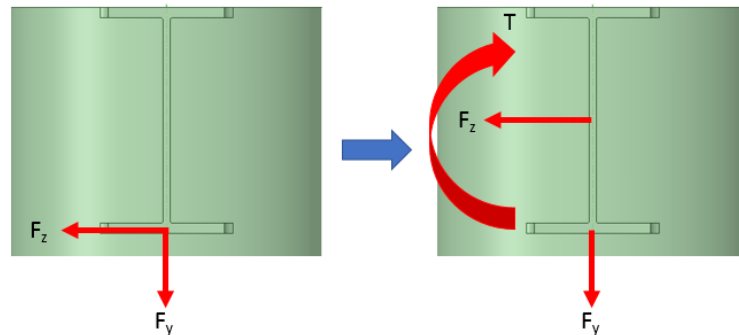
REFERENCIA	DIMENSIONES						DETALLES CONSTRUCTIVOS					SUPERFICIE	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA SECCIÓN													
	Peso kg/m	h mm	b mm	t <sub>w</sub> mm	t <sub>f</sub> mm	r mm	A cm <sup>2</sup>	I <sub>y</sub> mm <sup>4</sup>	I <sub>x</sub> mm <sup>4</sup>	I <sub>xy</sub> mm <sup>4</sup>	θ		P <sub>min</sub> mm	P <sub>max</sub> mm	A <sub>t</sub> m <sup>2</sup> /m	A <sub>e</sub> cm <sup>2</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>pl,y</sub> cm <sup>3</sup>	A <sub>we</sub> cm <sup>2</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>pl,y</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>xy</sub> cm <sup>4</sup>	S <sub>y</sub> mm	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>
IPE 100	8.1	100	55	4.1	5.7	7	10.32	88.6	74.6	-	-	-	-	0.4	49.33	171	34.2	39.41	5.08	15.92	5.79	9.15	1.24	23.7	1.2	0.35
IPE 120	10.4	120	64	4.4	6.3	7	13.21	107.4	93.4	-	-	-	-	0.475	45.82	317.8	52.96	60.73	6.31	27.67	8.65	13.58	1.45	25.2	1.74	0.89
IPE 140	13.0	140	72	4.7	6.9	7	16.42	126.2	112.2	-	-	-	-	0.551	42.7	541.2	77.22	89.24	7.64	44.02	12.21	10.26	1.66	26.7	2.46	1.08
IPE 160	15.8	160	82	5	7.4	9	20.09	145.2	127.2	-	-	-	-	0.623	39.47	869.3	108.7	123.9	9.66	68.31	16.66	26.1	1.84	30.3	3.6	3.98
IPE 180	18.8	180	91	5.3	8	9	23.95	164	146	M10	55	58	0.698	37.13	1317	146.3	166.4	11.25	100.9	22.16	34.6	2.05	31.8	4.79	7.43	
IPE 200	22.4	200	100	5.6	8.5	12	28.48	183	159	M10	56	67	0.768	34.36	1943	194.3	220.6	14	142.4	28.47	44.61	2.24	36.7	6.98	12.99	

Fuente: Consorcio metalúrgico nacional – COLMENA [21]

Estado de esfuerzos:

Al trasladar las fuerzas al centro de la sección A-B donde se debe hacer la verificación estática se generan esfuerzos normales y cortantes debido a las cargas que se muestran en la figura 30 y en la tabla 3. La fuerza  $F_z$  al no estar ubicada en el centroide de la sección, produce un momento torsor paralelo a este eje.

Figura 30. Distribución de cargas en la sección de la viga



Fuente: Autores

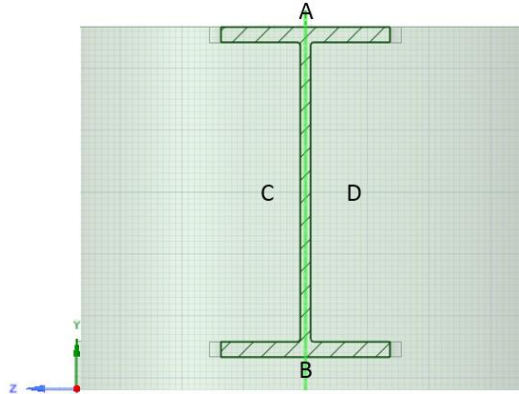
Tabla 3. Cargas en la sección de análisis viga

CARGA	TIPO DE CARGA	ESFUERZO
$F_y$	Momento flector	Normal ( $S$ )
$F_z$	Fuerza cortante	Cortante ( $S_s$ )
$T$	Momento torsor	Cortante ( $S_s$ )

Fuente: Autores

Al igual que como se mencionó anteriormente, al trasladar la fuerza en el eje Z desde el punto de aplicación hasta el centro de la sección transversal se produce un momento torsor paralelo al eje X, mientras que la fuerza en el eje Y solo produce un momento flector paralelo al eje Z. El sentido del momento mostrado en la figura 30 es una suposición y el verdadero sentido depende del producto cruz. Las fuerzas conservan sus sentidos iniciales ( $F_y$  paralela al eje Y negativo y  $F_z$  puede variar de manera alternada paralela en el eje Z positivo y negativo). Los puntos críticos de la sección se muestran en la figura 31.

Figura 31. Puntos críticos en la sección transversal de la viga



Fuente: Autores

Valores de las cargas:

Como en el análisis en el tubo, las fuerzas  $F_y$  y  $F_z$  no cambian sus valores ni sus sentidos. El momento torsor se calcula con el ya mencionado producto cruz:

$$T = r \times F_z \quad (25)$$

Donde  $r$  es el vector en los ejes coordenados desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el punto de análisis.

$$T = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & -h/2 & 0 \\ 0 & 0 & 298,02 \text{ N} \end{vmatrix}$$

$$T = \left\{ \left( -\frac{h}{2} \right) (298,02 \text{ N}) - (0)(0) \right\} i - \left\{ (0)(298,02 \text{ N}) - 0(0) \right\} j + \left\{ (0)(0) - 0 \left( -\frac{h}{2} \right) \right\} k$$

$$T = \left( -298,02 \left( \frac{h}{2} \right) \text{ N} \cdot \text{mm} \right) i$$

De la misma manera se calcula el momento flector producido por la fuerza  $F_y$  (ecuación 8), en este caso  $r$  es la longitud de la viga, por lo tanto:

$$M = \begin{matrix} & i & j & k \\ \begin{matrix} -2650 \text{ mm} \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ -2427,53 \text{ N} \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \end{matrix}$$

$$M = \{(0)(0) - (-2427,53 \text{ N})(0)\}i - \{(-2650 \text{ mm})(0) - 0(0)\}j + \{(-2650 \text{ mm})(-2427,53 \text{ N}) - 0(0)\}k$$

$$M = 6428,61 \text{ N.m}$$

- Esfuerzo debido al momento flector  $M$  (generado por  $F_y$ )

$$S_f = \pm \frac{Mc}{I} \quad (12)$$

$c$  = Distancia desde el eje neutro hasta la fibra más alejada

$I$  = Momento de inercia, tomado de catálogo

$$c = \frac{h}{2} = \frac{0,160 \text{ m}}{2} = 0,08 \text{ m} \quad (13)$$

$$I = 869,3 \text{ cm}^4$$

$$S_f = \pm \frac{6428,61 \text{ N.m} * 0,08 \text{ m}}{869,3 \text{ cm}^4 \left(\frac{1}{100}\right)^4} = 59161256,18 \text{ Pa}$$

Distribución de esfuerzos en la sección: Esfuerzo de tracción en la fibra B, esfuerzo de compresión en la fibra A, figura 32.

Figura 32. Distribución del esfuerzo flector



Fuente: Autores

Al calcular el esfuerzo normal, los dos puntos son críticos a compresión y tracción respectivamente:

$$\text{Punto A: } S = -S_f \quad (26)$$

$$\text{Punto B: } S = +S_f \quad (27)$$

- Esfuerzo cortante debido a fuerza cortante  $F_z$

$$S_c = \frac{F_z \cdot Q}{I \cdot b} \quad (17)$$

$Q$  = Primer momento de área de la sección

$I$  = Momento de inercia

$b$  = Ancho de la sección

Para una sección IPE, con algún tratamiento matemático [22]:

$$S_c = \frac{F_z}{h(t_w)} \quad (28)$$

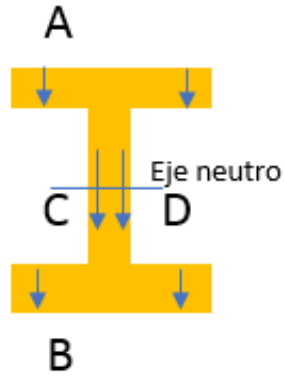
$$S_c = \frac{298,02 \text{ N}}{0,127 \text{ m}(0,005 \text{ m})}$$

$$S_c = 469011,02 \text{ Pa}$$



Distribución de esfuerzos en la sección: Máximo a lo largo del eje neutro, mostrado en la figura 33.

Figura 33. Distribución del esfuerzo cortante



Fuente: Autores

- Esfuerzo debido a momento torsor  $T$

$$S_t = \frac{Tc}{J} \quad (20)$$

$c$  = Distancia desde el centro hasta la fibra más alejada

$J$  = Momento polar de inercia [23]

$$c = \frac{h}{2} = \frac{0,16 \text{ m}}{2} = 0,08 \text{ m} \quad (13)$$

$$J = \frac{1}{3} \sum a_i b_i^3 = \frac{1}{3} (t_f(b)^3(2) + d(t_w)^3) \quad (29)$$

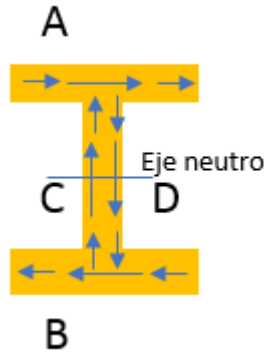
$$J = \frac{1}{3} (0,007 \text{ m}(0,082 \text{ m})^3(2) + 0,127 \text{ m}(0,005 \text{ m})^3) = 0,00000258 \text{ m}^4$$

$$S_t = \frac{(-298,02(160/2) \text{ N} \cdot \text{mm})(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}})(0,08 \text{ m})}{0,00000258 \text{ m}^4}$$

$$S_t = 738738,25 \text{ Pa}$$

Distribución de esfuerzos en la sección: Máximo en las fibras A y B, y en los puntos C y D (extremos del eje neutro). Ver figura 34.

Figura 34. Distribución del esfuerzo de torsión



Fuente: Autores

Finalmente se calcula el esfuerzo cortante presente en la sección transversal así:

$$\text{Punto C:} \quad -S_c + S_t = S_s \quad (30)$$

$$\text{Punto D:} \quad -S_c - S_t = S_s \quad \rightarrow \quad \text{Más crítico} \quad (31)$$

$$S_s = 469011,02 \text{ Pa} + 738738,25 \text{ Pa}$$

$$S_s = 1207749,27 \text{ Pa} = \mathbf{1,21 \text{ MPa}}$$

Esfuerzo cortante máximo que se produce en la sección y ocurre en el punto D, siendo un esfuerzo en la dirección del eje Z.

- Teoría de falla

Se elige la fibra B como la más crítica ya que soporta el máximo esfuerzo normal y el máximo esfuerzo cortante por torsión, el esfuerzo cortante por fuerza cortante puede ser despreciado debido a su magnitud pequeña respecto a los demás esfuerzos. Aplicando TECO para este punto:

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{S}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{S_s}{S_{ys}}\right)^2 \quad (7)$$

$$S_{ys} = 0,577S_y \quad (6)$$

$$S_{ys} = 0,577(345 \text{ MPa}) = 199 \text{ MPa}$$

$$N^2 = \frac{1}{\left(\frac{S}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{S_s}{S_{ys}}\right)^2} \quad (24)$$

$$N^2 = \frac{1}{\left(\frac{59,16 \text{ MPa}}{345 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{1,21 \text{ MPa}}{199 \text{ MPa}}\right)^2}$$

$$N = 5,827$$

Factor de seguridad aceptable para las condiciones establecidas por la empresa [17].

### 3.3.3. Cargas de impacto

Suponiendo la eventualidad de que algún operario cargue la estructura de manera incorrecta o con más carga de la que fue diseñada, se hace un análisis de cargas de impacto en el tubo y verifica la resistencia de la grúa. Este análisis se hace con el fin de validar que, al ocurrir una situación de estas, la grúa no provocará accidentes en el tren de laminación ni daños en sí misma. Aunque lo recomendable es un factor de amplificación de dos [24], en este caso se selecciona un factor de amplificación igual a tres para tener una validación más conservadora:

$$F' = 3F \quad (32)$$

Por lo tanto

$$F'_y = (3)(-2427,53 \text{ N}) = -7282,59 \text{ N}$$

$$F'_z = (3)(298,02 \text{ N}) = 894,06 \text{ N}$$

$$M' = \begin{matrix} & i & j & k \\ \begin{matrix} -2650 \text{ mm} & -3000 \text{ mm} & 0 \\ 0 & -7282,59 \text{ N} & 894,06 \text{ N} \end{matrix} & & & \end{matrix}$$

$$M' = (-2680398 \text{ N} \cdot \text{mm})i - (-2367684,9 \text{ N} \cdot \text{mm})j + (19285841,4 \text{ N} \cdot \text{mm})k$$

Calculando los esfuerzos normal y cortante máximos se obtiene:

$$S = (3)16,15 \text{ MPa} = 48,45 \text{ MPa}$$

$$S_s = (3)0,9811 \text{ MPa} = 2,94 \text{ MPa}$$

Como se puede observar, los esfuerzos son directamente proporcionales a la fuerza, por lo tanto, es correcto multiplicarlos por el factor amplificador elegido. El análisis de los puntos críticos es el mismo para esta nueva situación y los valores de  $S_y$  y  $S_{ys}$  se conservan.

Aplicando la teoría de falla TECO (ecuación 24) para el mismo punto B:

$$N^2 = \frac{1}{\left(\frac{48,45 \text{ MPa}}{320 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{2,94 \text{ MPa}}{184,6 \text{ MPa}}\right)^2}$$

$$N = 6,56$$

Para la viga se realiza el mismo procedimiento:

$$S = (3)59,16 \text{ MPa} = 177,48 \text{ MPa}$$

$$S_s = (3)1,21 \text{ MPa} = 3,63 \text{ MPa}$$

$$N^2 = \frac{1}{\left(\frac{177,48 \text{ MPa}}{345 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{3,63 \text{ MPa}}{199 \text{ MPa}}\right)^2}$$

$$N = 1,94$$

Se puede observar que el factor de seguridad disminuye de manera abrupta, incluso por debajo de los parámetros establecidos por la empresa para el caso de fatiga, y por ello es importante definir protocolos de accionamiento de la grúa, evitando al máximo que opere bajo estas condiciones de carga.

### 3.3.4. Teorema de Castigliano

De acuerdo a R. Budynas el teorema de Castigliano es una herramienta bastante importante y simple al momento de calcular las deflexiones de elementos estructurales. Este teorema expone que “cuando actúan fuerzas sobre sistemas elásticos sujetos a desplazamientos pequeños, el desplazamiento correspondiente a cualquier fuerza, colineal con la fuerza, es igual a la derivada parcial de la energía de deformación total con respecto a esa fuerza”<sup>1</sup>. Escrito matemáticamente:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial F} \quad (33)$$

---

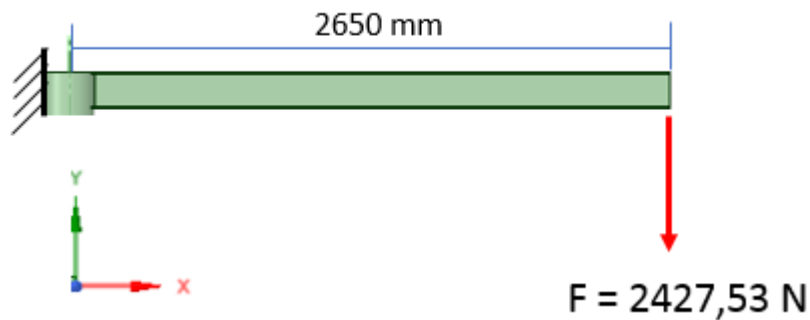
<sup>1</sup> BUDYNAS, R. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México DF, México. 2008.

donde  $\delta$  es el desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza  $F$  en la dirección de esta. Para la situación analizada, se supone que la viga hace parte de la grúa como una viga empotrada en uno de sus extremos y analizando cada una de sus cargas de manera independiente.

- Análisis en el plano X-Y

Para realizar el análisis se toman las variables mostradas en la figura 35 y se realiza el diagrama de cuerpo libre de estas, en la figura 36.

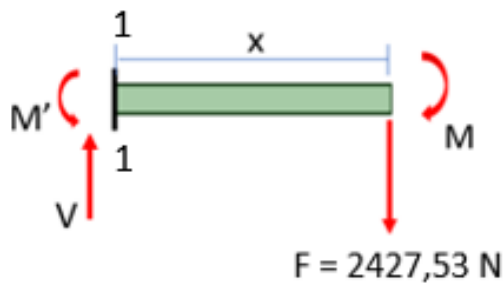
Figura 35. Esquema para análisis por Teorema de Castigliano, plano XY



Fuente: Autores

Corte 1-1

Figura 36. Diagrama de cuerpo libre plano XY



Fuente: Autores

$$\sum M' = 0 \quad (34)$$

$$M' + M + F(x) = 0 \quad (35)$$

$$M' = -F(x) - M \quad (36)$$

Donde  $M = 0$  ya que es un valor agregado para efectos del cálculo. Se obtienen las derivadas de  $M'$  respecto a cada una de las cargas.

$$\frac{\partial M'}{\partial F} = -x \quad (37)$$

$$\frac{\partial M'}{\partial M} = -1 \quad (38)$$

Aplicando el teorema de Castigliano:

$$\frac{\partial U}{\partial F} = \int \frac{M'(x)}{EI} \left( \frac{\partial M'}{\partial F} \right) dx = \delta \quad (39)$$

$$\delta = \frac{1}{EI} \int (-F(x) - M)(-x) dx = \frac{1}{EI} \left( F \cdot \frac{x^3}{3} \right) \Big|_0^L \quad (40)$$

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} = \frac{(2427,53 \text{ N})(2,65 \text{ m})^3}{3(210 \text{ GPa})(869,3 \text{ cm}^4) \left( \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)^4} \quad (41)$$

$$\delta = 0,00824 \text{ m} = 8,24 \text{ mm}$$

$$\frac{\partial U}{\partial M} = \int \frac{M'(x)}{EI} \left( \frac{\partial M'}{\partial M} \right) dx = \beta \quad (42)$$

$$\beta = \frac{1}{EI} \int (-F(x) - M)(-1) dx = \frac{1}{EI} \left( F \cdot \frac{x^2}{2} \right) \Big|_0^L \quad (43)$$

$$\beta = \frac{FL^2}{2EI} = \frac{(2427,53 \text{ N})(2,65 \text{ m})^2}{2(210 \text{ GPa})(869,3 \text{ cm}^4) \left( \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)^4} \quad (44)$$

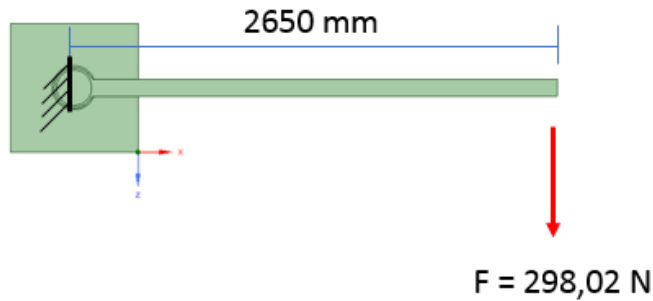
$$\beta = 0,004 \text{ rad}$$

Donde  $\delta$  es el desplazamiento y  $\beta$  es la pendiente de la recta tangente a la curva elástica en el punto extremo de la viga.

- Análisis en el plano X-Z

Al igual que en el análisis anterior, se toman las variables mostradas en la figura 37 y se realiza el diagrama de cuerpo libre, en la figura 38.

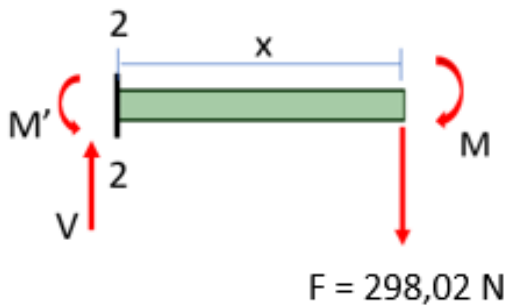
Figura 37. Esquema para análisis por Teorema de Castigliano, plano XZ



Fuente: Autores

Corte 2-2

Figura 38. Diagrama de cuerpo libre plano XZ



Fuente: Autores

El desarrollo matemático del teorema es igual que en la sección anterior por ser una configuración similar, se aplican las ecuaciones teniendo en cuenta que el momento de inercia varía por la orientación que tiene la carga en la viga:

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} = \frac{(298,02 \text{ N})(2,65 \text{ m})^3}{3(210 \text{ GPa})(68,31 \text{ cm}^4)(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}})^4} \quad (41)$$

$$\delta = 0,0128 \text{ m} = 12,8 \text{ mm}$$

$$\beta = \frac{FL^2}{2EI} = \frac{(298,02 \text{ N})(2,65 \text{ m})^2}{2(210 \text{ GPa})(68,31 \text{ cm}^4)(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}})^4} \quad (44)$$

$$\beta = 0,0073 \text{ rad}$$

En este eje se produce una deflexión mayor en el eje XY ya que su momento de inercia es menor por la configuración de la sección transversal del perfil. Las deflexiones están dentro del rango permitido para estos diseños según Beléndez [25], tomando un valor  $\beta=0,25$ :

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{2EI\beta}{L^2} \quad (45)$$

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{2 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot 68,31 \text{ cm}^4 \cdot \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right)^4 \cdot 0,25}{(2,65 \text{ m})^2}$$

$$F_{m\acute{a}x} = 10212 \text{ N}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} \approx \frac{FL^3}{3EI} = \frac{10212 \text{ N} \cdot (2,65 \text{ m})^3}{3 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot 68,31 \text{ cm}^4 \cdot \left(\frac{1}{100}\right)^4}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 0,441 \text{ m} = 441,5 \text{ mm}$$

### 3.3.5. Excentricidad por fórmula de la secante

En el mismo libro de Budynas [26], se puede encontrar información sobre las cargas aplicadas de manera excéntrica a una columna. Este análisis determina hasta qué distancia en la excentricidad se puede aplicar una carga sin que la columna falle o sufra pandeo.

El procedimiento para validar esta condición es [27]:

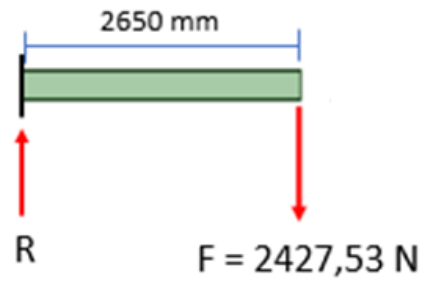
- Cálculo de las reacciones en la columna
- Cálculo de la relación de esbeltez de la columna
- Cálculo del factor de seguridad
- Cálculo del esfuerzo aplicado y el esfuerzo admisible
- Cálculo de la fuerza crítica
- Aplicación de la fórmula de la secante

- Cálculo de las reacciones:

Para realizar los cálculos se toman los diagramas de cuerpo libre mostrados en las figuras 39 y 40.



Figura 39. Diagrama de cuerpo libre de la viga para cálculo de excentricidad



Fuente: Autores

$$\sum F = 0 \quad (46)$$

$$-F + R = 0 \quad (47)$$

$$R = F = 247,54 \text{ kgf}$$

Figura 40. Diagrama de cuerpo libre del tubo para cálculo de excentricidad



Fuente: Autores

De acuerdo a la ecuación mostrada posteriormente, las variables necesarias se consignan en la tabla 4 y fueron obtenidos de acuerdo con la sección 3.3.1. El valor del radio de giro  $r_x$  se calcula como  $\sqrt{\frac{I}{A}}$ .

Tabla 4. Variables necesarias para cálculo de excentricidad

VARIABLE	MAGNITUD
$E$	210 GPa
$S_y$	320 MPa
$r_x$	0,0729 mm
$c$	0,1095 mm

Fuente: Autores

- Cálculo de la relación de esbeltez:

Para la longitud equivalente  $L_e$  se asume un  $K = 2$  ya que la columna se encuentra empotrada en sus dos extremos y  $L$  sería su altura. Por lo tanto,  $L_e = K \cdot L$ .

$$\frac{L_e}{r_x} = \frac{3 \text{ m}(2)}{0,0729 \text{ m}} = 82,3 \quad (48)$$

Por ser acero estructural, se tiene:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 (210000 \text{ MPa})}{320 \text{ MPa}}} \quad (49)$$

$$C_c = 113,81$$

Como  $\frac{L_e}{r_x} < C_c$  la columna es considerada como corta.

- Cálculo del factor de seguridad:

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3}{8} \left( \frac{L_e/r_x}{C_c} \right) - \frac{1}{8} \left( \frac{L_e/r_x}{C_c} \right)^2 \quad (50)$$

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3}{8} \left( \frac{82,3}{113,81} \right) - \frac{1}{8} \left( \frac{82,3}{113,81} \right)^2 = 1,87$$

- Cálculo del esfuerzo aplicado y el esfuerzo admisible

Por ser una columna corta, el esfuerzo admisible es:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma}{FS} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \left( \frac{L_e/r_x}{C_c} \right)^2 \right) \quad (51)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{320 \text{ MPa}}{1,87} \left(1 - \frac{1}{2} \left( \frac{82,3}{113,81} \right)^2 \right) = 126,38 \text{ MPa}$$

El esfuerzo aplicado es un esfuerzo axial definido como:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi}{4}(d_e^2 - d_i^2)} \quad (52)$$

$$\sigma = \frac{2427,53 \text{ N}}{\frac{\pi}{4}((0,219 \text{ m})^2 - (0,193 \text{ m})^2)} = 0,288 \text{ MPa}$$

Como  $\sigma < \sigma_{adm}$ , se concluye que la columna es apta para la aplicación.

- Cálculo de la fuerza crítica

Es importante conocer la carga aplicable a la columna antes que esta se pandee. Se le llama carga crítica de Euler al valor de la fuerza que hace que se alcance la condición de deformación plástica. [28]

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (53)$$

Los valores del momento de inercia y el módulo de elasticidad son tomados de la sección 3.1.1 y de la tabla 4 respectivamente.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot 0,0000448 \text{ m}^4}{(2,65 \text{ m})^2}$$

$$F_{cr} = 13223 \text{ kN}$$

- Aplicación de la fórmula de la secante:

La fórmula de la secante está definida como:

$$\frac{F}{A} = \frac{\sigma_{adm}}{1 + \frac{ec}{r_x^2} \left( \sec\left(\frac{L_e}{2r_x} \sqrt{\frac{F}{EA}}\right) \right)} \quad (54)$$

donde:

$F$  = Fuerza aplicada

$A$  = Área de la sección transversal

$\sigma_{adm}$  = Esfuerzo admisible

$e$  = Excentricidad

$c$  = Distancia hasta la fibra más alejada de la sección

$r_x$  = Radio de giro

$L_e$  = Longitud equivalente

$E$  = Módulo de elasticidad del material

Despejando  $e$  se obtiene:

$$e = \frac{r_x^2}{c \cdot \sec\left(\frac{L_e}{2r_x} \sqrt{\frac{F}{EA}}\right)} \cdot \left( \frac{A \cdot \sigma_{adm}}{F} - 1 \right) \quad (55)$$

Los valores ya conocidos son reemplazados de manera simultánea en la ecuación, y operando matemáticamente se tiene que:

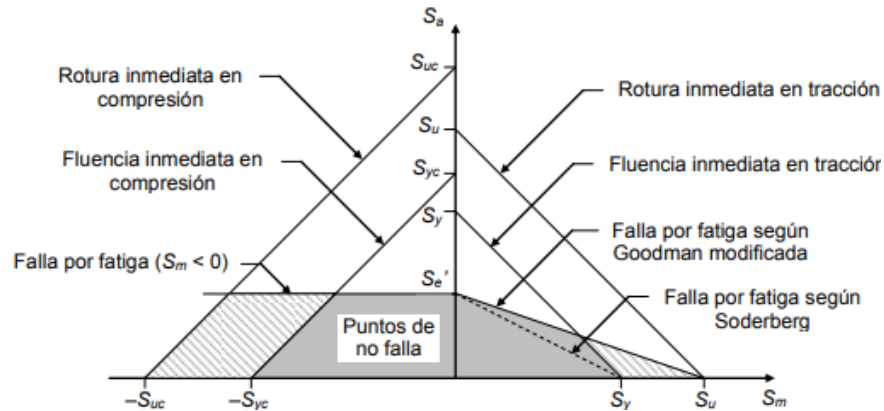
$$e = 21,20 \text{ m}$$

Este valor indica que la carga puede ser aplicada aproximadamente a 20 m sin que la columna presente pandeo. Para la grúa que se está diseñando, el valor máximo de excentricidad sería 2,65 m (longitud del brazo) por lo tanto está en el rango adecuado para el diseño por carga excéntrica.

### 3.4. ANÁLISIS DEL DISEÑO POR FATIGA

Dentro de los muchos motivos para que una estructura falle, existe la posibilidad de un desgaste por ciclos repetitivos de cargas a los que son sometidos y los picos que estos pueden traer consigo. Esto se conoce como fatiga y está definido de acuerdo con los ciclos de carga que se espera pueda resistir la estructura, las diferentes teorías de falla se muestran en la figura 41.

Figura 41. Teorías de falla por fatiga



Fuente: Diseño de elementos de máquinas [19]

De acuerdo con la aplicación se usará el criterio de Soderberg para materiales dúctiles para obtener un diseño conservador ya que utiliza como criterio de falla la resistencia a la fluencia, calculando como esfuerzo en el punto de análisis el esfuerzo equivalente de Von Mises o esfuerzo debido a la energía de distorsión, ya que en toda la estructura se producen combinaciones de esfuerzos. Esto es:

$$\frac{1}{N} = \left( \frac{\sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2}}{S_y} + \frac{\sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2}}{S_n} \right) \quad (56)$$

donde:

$N$  = Factor de seguridad

$S_y$  = Esfuerzo de fluencia

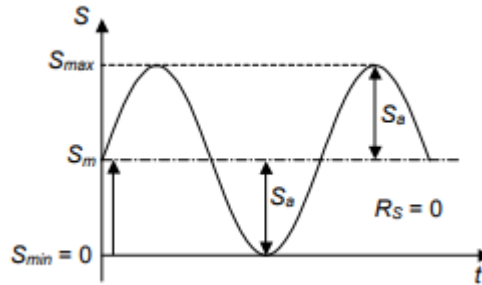
$S_n$  = Esfuerzo a la fatiga corregida

$\sigma$  = Esfuerzo normal equivalente de Von Mises

$\tau$  = Esfuerzo cortante equivalente de Von Mises

Esta expresión de la teoría de falla por el criterio de Soderberg es válida cuando se trata de elementos usados en la práctica con  $S_m > 0$ . Los diferentes esfuerzos que se presentan en la sección están definidos como mutuamente sincrónicos en fase, es decir, alcanzan su valor máximo simultáneamente y actúan con la misma frecuencia (esfuerzos multiaxiales simples) debido a que la carga es repetitiva en una dirección, ver figura 42. [19]

Figura 42. Comportamiento de la carga respecto al tiempo



Fuente: Diseño de elementos de máquinas [19]

Los subíndices  $m$  y  $a$  indican esfuerzos medios y alternos respectivamente. El factor de concentración de esfuerzos ( $K_f$ ) se incluye en los cálculos del esfuerzo normal y cortante como se muestra:

$$\sigma = K_f \cdot S \quad (57)$$

$$\tau = K_{fS} \cdot S_S \quad (58)$$

El esfuerzo normal medio se calcula, igual para el esfuerzo cortante:

$$S_m = \frac{S_{m\acute{a}x} + S_{m\acute{i}n}}{2} \quad (59)$$

El esfuerzo normal alterno se calcula, igual para el esfuerzo cortante:

$$S_a = \frac{S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}n}}{2} \quad (60)$$

Límite de resistencia a la fatiga corregida: este límite es menor al esfuerzo de fluencia para cada material. El límite de fatiga corregida se define así:

$$S_n = K \cdot S_{e'} \quad (61)$$

donde:

$K$  = Factor que afecta la resistencia por factores varios.

$S_{e'}$  = Límite de resistencia a la fatiga

$$S_{e'} = 0,5S_u, \text{ para vida infinita } (>10^6 \text{ ciclos}) \quad (62)$$

Factores que afectan el límite de resistencia a la fatiga  $S_n$

- Estado superficial  $K_a$
- Tamaño de la pieza  $K_b$
- Confiabilidad del cálculo  $K_c$
- Temperatura  $K_d$
- Efectos varios (corrosión, esfuerzos residuales y otros)  $K_e$
- Tipo de carga  $K_{car}$
- Concentradores de esfuerzos  $K_f$

Los efectos de los aspectos mencionados anteriormente sobre la resistencia a la fatiga se cuantifican mediante los factores  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_c$ ,  $K_d$ ,  $K_e$  y  $K_{car}$ , cuyo producto se designa con el término  $K$  [19].

El criterio descrito anteriormente se debe aplicar a la columna de la grúa y a su brazo o viga, ya que en ambos puede ocurrir una falla por este motivo debido a que se producen esfuerzos de diferente naturaleza y magnitud.

### 3.4.1. Análisis en el tubo

El punto B en el que se analizará el efecto de la fatiga en el tubo o columna soporta las mismas cargas con las cuales se realizó el análisis estático, mostradas en la figura 20. En la tabla 5 se muestra un resumen de las cargas que actúan en la sección de análisis.

Tabla 5. Resumen de cargas que actúan en la sección transversal del tubo

CARGA	MAGNITUD	TIPO DE CARGA	ESFUERZO
$F_y$	-2427,53 N	Fuerza axial	Normal ( $S$ )
$F_z$	298,02 N	Fuerza cortante	Cortante ( $S_s$ )
$M_x$	-893466 N.mm	Momento flector	Normal ( $S$ )
$M_y$	789228,3 N.mm	Momento torsor	Cortante ( $S_s$ )
$M_z$	6428613,8 N.mm	Momento flector	Normal ( $S$ )

Fuente: Autores

Por lo tanto, sus esfuerzos máximos correspondientes son:

$$S_{ax} = -288453,26 \text{ Pa}$$

$$S_f = \pm 15863812,5 \text{ Pa}$$

$$S = -S_{ax} - S_f \quad (16)$$

$$S = -16,15 \text{ MPa}$$

$$S_c = 16756,13 \text{ Pa}$$

$$S_t = 964396,76 \text{ Pa}$$

$$S_s = S_c + S_t \quad (23)$$

$$S_s = 0,9811 \text{ MPa}$$

Calculando esfuerzos medios y alternos, teniendo las fuerzas repetidas en una dirección como ya se mencionó, ver figura 42, es decir, con el esfuerzo mínimo en todos los casos igual a cero:

$$S_m = \frac{S_{m\acute{a}x}}{2}; S_a = \frac{S_{m\acute{a}x}}{2} \quad (59, 60)$$

$$S_m = S_a = \frac{-16,15 \text{ MPa}}{2}$$

$$S_m = S_a = 8,075 \text{ MPa}$$

$$S_{sm} = \frac{S_{sm\acute{a}x}}{2}; S_{sa} = \frac{S_{sm\acute{a}x}}{2} \quad (63, 64)$$

$$S_{sm} = S_{sa} = \frac{0,9811 \text{ MPa}}{2}$$

$$S_{sm} = S_{sa} = 0,49 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos equivalentes de Von Mises se obtienen como se muestra a continuación a partir de las ecuaciones 57 y 58, con el factor por concentración de esfuerzos normal y cortante igual a uno ya que se trata de un tubo liso (no existen discontinuidades que produzcan concentración de esfuerzos).

$$\sigma_m = 1 \cdot 8,075 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = 1 \cdot 8,075 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = 1 \cdot 0,49 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = 1 \cdot 0,49 \text{ MPa}$$

Finalmente, el límite de resistencia a la fatiga corregido:



$$S_n = K S_{e'} \quad (61)$$

$$S_{e'} = 0,5 S_u = 0,5(430 \text{ MPa}) \quad (62)$$

$$S_{e'} = 215 \text{ MPa}$$

$$K = \begin{cases} K_a=0,72 \rightarrow \text{Gráfica proceso laminado en caliente} \\ K_b=0,75 \rightarrow \text{Con } d=0,37d_e, K_b=1,51d_e^{-0,157} \\ K_c=0,753 \rightarrow \text{Asumiendo 99,9\% de confiabilidad} \\ K_d=1 \rightarrow \text{Aplicación con } T < 450 \text{ } ^\circ\text{C} \\ K_e=1 \rightarrow \text{No considera efectos externos} \\ K_{car}=0,7 \rightarrow \text{Para cargas combinadas} \end{cases}$$

$$K = 0,284$$

La metodología para el cálculo de los factores se pueden encontrar en [19]. Utilizando los valores recomendados en la misma referencia, se calcula el límite de resistencia a fatiga corregida:

$$S_n = 0,284 \cdot 215 \text{ MPa}$$

$$S_n = \mathbf{61,06 \text{ MPa}}$$

Se aplica la teoría de falla de Soderberg para calcular el factor de seguridad:

$$N = \frac{1}{\frac{\sqrt{(8,075 \text{ MPa})^2 + 3(0,49 \text{ MPa})^2}}{320 \text{ MPa}} + \frac{\sqrt{(8,075 \text{ MPa})^2 + 3(0,49 \text{ MPa})^2}}{61,06 \text{ MPa}}}$$

$$N = \mathbf{6,5}$$

### 3.4.2. Análisis en la viga

Como en el caso de falla estática, se busca que el diseño tenga un factor de seguridad aproximado a cinco bajo las cargas que soporta la viga. Se realiza el análisis en el mismo punto B ya que allí se encuentran los máximos esfuerzos, como se calcularon en la sección 3.3.2, en la tabla 6 se muestra el resumen de las cargas.

Tabla 6. Resumen de cargas que actúan en la sección transversal de la viga

CARGA	MAGNITUD	TIPO DE CARGA	ESFUERZO
$M$ (Debido a $F_y$ )	6428,61 N.m	Momento flector	Normal ( $S$ )
$F_z$	298,02 N	Fuerza cortante	Cortante ( $S_s$ )
$T$	23,84 N.m	Momento torsor	Cortante ( $S_s$ )

Fuente: Autores

Los esfuerzo normal y cortante no varían dependiendo del análisis que se realiza, por lo tanto son similares a los calculados en el análisis estático, sus resultados son:

$$S = +S_f \quad (27)$$

$$S = 59,161 \text{ MPa}$$

$$S_c = 469011,02 \text{ Pa}$$

$$S_t = 738738,25 \text{ Pa}$$

$$S_s = -S_c - S_t \quad (31)$$

$$S_s = 1,21 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos medios y alternos se calculan utilizando el mismo procedimiento desarrollado para el tubo ya que la carga mínima sigue siendo cero, ver figura 42.

$$S_m = \frac{S_{m\acute{a}x}}{2}; S_a = \frac{S_{m\acute{a}x}}{2} \quad (59, 60)$$

$$S_m = S_a = \frac{59,16 \text{ MPa}}{2}$$

$$S_m = S_a = 29,58 \text{ MPa}$$

$$S_{sm} = \frac{S_{sm\acute{a}x}}{2}; S_{sa} = \frac{S_{sm\acute{a}x}}{2} \quad (63, 64)$$

$$S_{sm} = S_{sa} = \frac{1,21 \text{ MPa}}{2}$$

$$S_{sm} = S_{sa} = \mathbf{0,605 \text{ MPa}}$$

En este caso la viga no tiene cambios de sección o perforaciones, por lo tanto su coeficiente  $K_f$  es igual a uno en las dos solicitaciones. Calculando los esfuerzos equivalentes de Von Mises:

$$\sigma_m = 1 \cdot 29,58 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = 1 \cdot 29,58 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = 1 \cdot 0,605 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = 1 \cdot 0,605 \text{ MPa}$$

Se obtiene el límite de resistencia a la fatiga corregido:

$$S_n = K S_{e'} \quad (61)$$

$$S_{e'} = 0,5 S_u = 0,5(450 \text{ MPa}) \quad (62)$$

$$S_{e'} = 225 \text{ MPa}$$

$$K = \begin{cases} K_a = 0,72 \rightarrow \text{Gráfica proceso laminado en caliente} \\ K_b = 0,741 \rightarrow \text{Con } d = 0,808\sqrt{hb}, K_b = 1,51d_e^{-0,157} \\ K_c = 0,753 \rightarrow \text{Asumiento 99,9\% de confiabilidad} \\ K_d = 1 \rightarrow \text{Aplicación con } T < 450 \text{ }^\circ\text{C} \\ K_e = 1 \rightarrow \text{No considera efectos externos} \\ K_{car} = 0,7 \rightarrow \text{Para cargas combinadas} \end{cases}$$

$$K = 0,281$$

La metodología para el cálculo de los factores se pueden encontrar en [19]. Utilizando los valores recomendados por el autor en la misma referencia, se calcula el límite de resistencia a fatiga corregida:

$$S_n = 0,281 \cdot 225 \text{ MPa}$$

$$S_n = \mathbf{63,27 \text{ MPa}}$$

Se aplica la teoría de falla de Soderberg para calcular el factor de seguridad:

$$N = \frac{1}{\frac{\sqrt{(29,58 \text{ MPa})^2 + 3(0,605 \text{ MPa})^2}}{345 \text{ MPa}} + \frac{\sqrt{(29,58 \text{ MPa})^2 + 3(0,605 \text{ MPa})^2}}{63,27 \text{ MPa}}}$$

$$N = 1,8$$

Este factor de seguridad no cumple con los requerimientos de la empresa, sin embargo es un factor de seguridad que se acepta en diseños para la aplicación estudiada (sección 3.2.2). Este factor de seguridad al ser mayor a uno asegura que la estructura puede trabajar con las condiciones especificadas, pero llegado el límite de su vida útil no resistiría mucho tiempo más.

### **3.5. ELEMENTOS SELECCIONADOS DE CATÁLOGO**

La etapa final del diseño de la grúa es la elección de los elementos adicionales para su funcionamiento, como son:

- Polipasto
- Tornillos de anclaje
- Carro para polipasto
- Soldadura

Las características necesarias de cada elemento fueron comentadas con ingenieros de la empresa, con experiencia en este tipo de dispositivos. Ellos hicieron las mejores recomendaciones para la aplicación en cuestión y la elección final con base a las cotizaciones generadas, se muestran en el anexo B de este documento.

## **4. VALIDACIÓN DEL DISEÑO EN SOFTWARE CAE**

El método de elementos finitos se viene implementado dentro de los diseños de piezas por su confiabilidad de simulación de escenarios a los que serán sometidas, ahorrando así en la construcción de prototipos y sus respectivos ensayos destructivos. El diseño objeto de este proyecto será validado de esta manera por medio del programa ANSYS WORKBENCH con su módulo Static Structural.

Para realizar una simulación acorde a lo que se espera en la realidad se debe configurar el software de manera correcta, tener en cuenta las medidas de la pieza, los materiales, factores de confiabilidad y teorías de falla aplicadas, todo esto acorde a lo mencionado en el capítulo anterior. Además de evaluar los resultados obtenidos para detectar alguna posible singularidad.

Las singularidades se identifican fácilmente ya que son puntos donde el esfuerzo aumenta de manera abrupta sin razón aparente, lo que haría fallar el elemento estudiado, sin necesariamente ser así. Esto debido posiblemente a la manera de simplificar la geometría estudiada, a la capacidad de cómputo del simulador o a la naturaleza misma del entorno simulado.

El modelo de la grúa presentado se realiza con base en las cargas y dimensiones expuestas en el capítulo 3. Se realizaron dos procesos de simulación de acuerdo a los análisis teóricos realizados para cada elemento (estático y por fatiga), y en cada uno se diferencian tres etapas: pre-proceso, simulación y resultados.

En la etapa de pre-proceso se hace la adecuación del modelo, además de agregar consideraciones adicionales a las previas que son generales para los dos análisis, y se seleccionan las soluciones que se desean visualizar en la solución. Durante la etapa de simulación el programa resuelve el modelo matemático por medio del cual se obtienen los resultados, mostrados en la etapa siguiente además de realizarse su análisis respectivo.

### **4.1. CONSIDERACIONES PREVIAS A LA SIMULACIÓN**

#### **4.1.1. Modelo**

Para la realización de la simulación es necesario generar un modelo 3D mediante el software CAD compatible para esta tarea denominado SpaceClaim. La grúa debe tener las medidas con las que fue realizado el análisis teórico y que se muestran en la tabla 7:

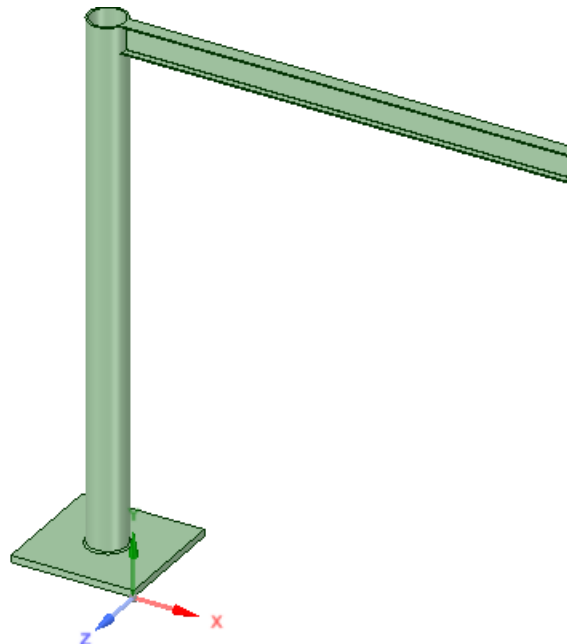
Tabla 7. Dimensiones de la grúa para modelo CAD

	<b>TUBO</b>	<b>VIGA</b>
Sección transversal	Diámetro exterior: 0,219 m Diámetro interior: 0,193 m	Ver figura 29
Largo	3 m	2,65 m

Fuente: Autores

El resultado del modelo debería ser como se muestra en la figura 43 a continuación, con los cuerpos separados (viga y tubo).

Figura 43. Modelo CAD para simulación



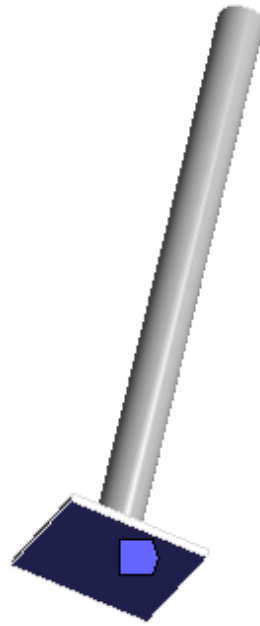
Fuente: Autores

#### 4.1.2. Restricciones

Considerando que se realizarán análisis independientes de los elementos de la grúa, cada uno de ellos debe ir anclado al lugar de apoyo, es decir, el tubo debe ir anclado por la parte posterior de la base como se muestra en la figura 44 al piso del tren de laminación y la viga soportada de manera fija en el extremo donde se supone

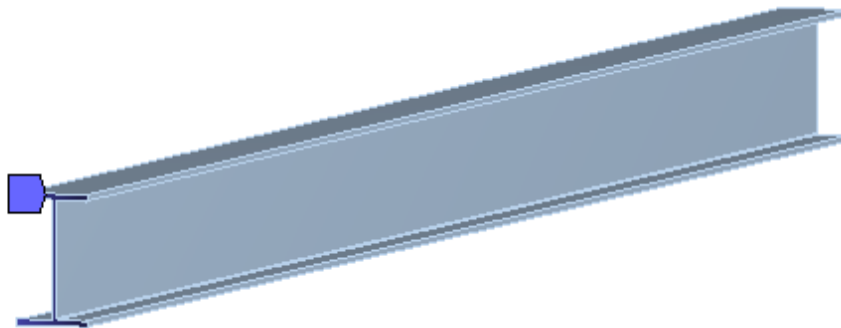
debe ir unida a la columna, ver figura 45. Se configura el software para dichas caras dentro del modelo no tengan desplazamientos en ninguno de los ejes coordenados agregando un apoyo fijo como se muestra en las figuras en color morado, siendo estas las únicas restricciones que existen en el diseño que se pretende validar.

Figura 44. Soporte fijo en tubo para simulación



Fuente: Autores

Figura 45. Soporte fijo en viga para simulación



Fuente: Autores

#### **4.1.3. Material**

Por defecto, el software trae algunos materiales con sus características y es preferible su uso ya que no se generan errores por este motivo. En caso de que se quiera agregar un material, los datos necesarios son la resistencia a la fluencia, resistencia última, densidad y módulo de Young.

El primer análisis (por carga estática) se realizará con acero ASTM A500 que será asignado al tubo y con acero ASTM A572 grado 50 agregado a la viga, estos materiales deben ser agregados a la biblioteca de materiales de ANSYS con sus propiedades ya conocidas en el capítulo anterior. El segundo análisis (por fatiga) se realizará con acero estructural por defecto ya que se encuentra mejor caracterizado dentro del programa y es bastante similar a los aceros utilizados para la construcción de la grúa.

#### **4.1.4. Cargas**

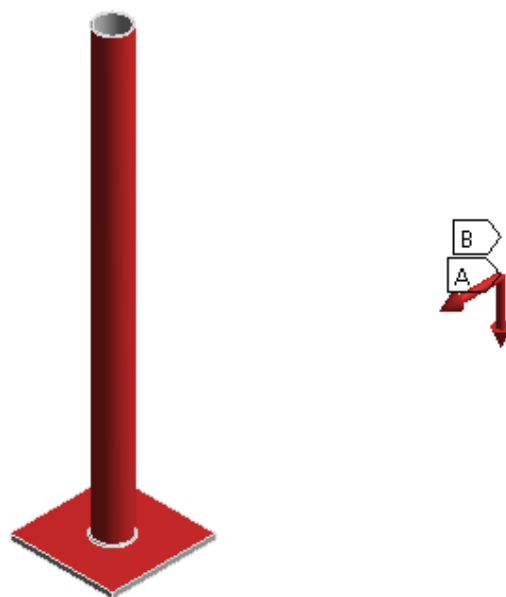
El programa ofrece la posibilidad de configurar las fuerzas de diferentes maneras para suplir las necesidades de los entornos simulados. Por recomendación del docente guía, la configuración de las cargas en el tubo se realizará de manera remota al tubo como se muestra en la figura 46, esto debido a que si se trabaja con el diseño de la grúa como un solo sólido, aparecen algunas singularidades que distorsionan los resultados. Las cargas en la viga se ubicarán de manera convencional en el extremo de la misma, ver figura 47.

La fuerza de la gravedad debe incluirse ya que, aunque no se consideró el peso de la grúa en los cálculos teóricos, el programa genera datos erróneos de no existir. Las magnitudes de las fuerzas deben ser las se vienen trabajando:

- Eje positivo Z: 298,02 N
- Eje negativo Y: 2427,53 N

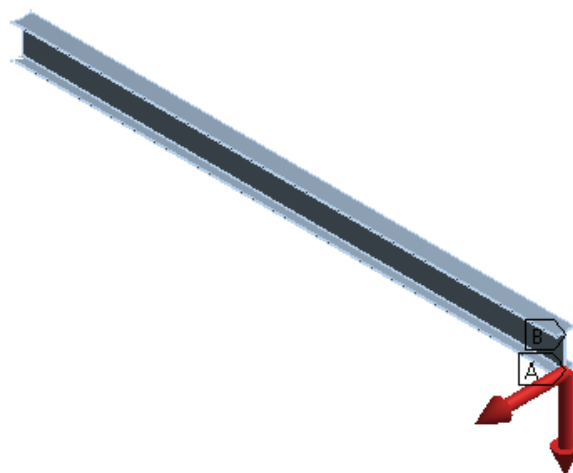


Figura 46. Configuración de fuerzas remotas en el tubo



Fuente: Autores

Figura 47. Configuración de fuerzas en la viga



#### 4.1.5. Mallado

Para obtener una malla que permita obtener resultados confiables con poco consumo computacional se debe realizar un proceso denominado “independencia de malla”, dicho proceso consiste en variar el tamaño y forma de los elementos de la malla buscando una convergencia en los resultados de esfuerzo y la mejor calidad de la misma. La tabla 8 muestra el resumen del estudio realizado y a partir de ellos se elige la que sea más apropiada para este caso particular.

Tabla 8. Resumen estudio de independencia de malla

TAMAÑO DEL ELEMENTO		TIPO DE MALLA		
		Por defecto	Tetraedros	Hexaedros
20 mm	Calidad	0,637	0,612	0,509
	Esfuerzo promedio (MPa)	20,125	19,125	25,25
	Factor de seguridad promedio	1,925	2,3625	2,3125
18 mm	Calidad	0,645	0,642	0,527
	Esfuerzo promedio (MPa)	20,875	18,75	23
	Factor de seguridad promedio	1,93875	2,3125	2,0875
15 mm	Calidad	0,678	<b>0,672</b>	0,582
	Esfuerzo promedio (MPa)	22,75	<b>21,75</b>	26
	Factor de seguridad promedio	1,8875	<b>2,05</b>	2,0125
12 mm	Calidad	0,711	0,708	0,657
	Esfuerzo promedio (MPa)	23,625	22,875	27
	Factor de seguridad promedio	1,75	1,75	1,625

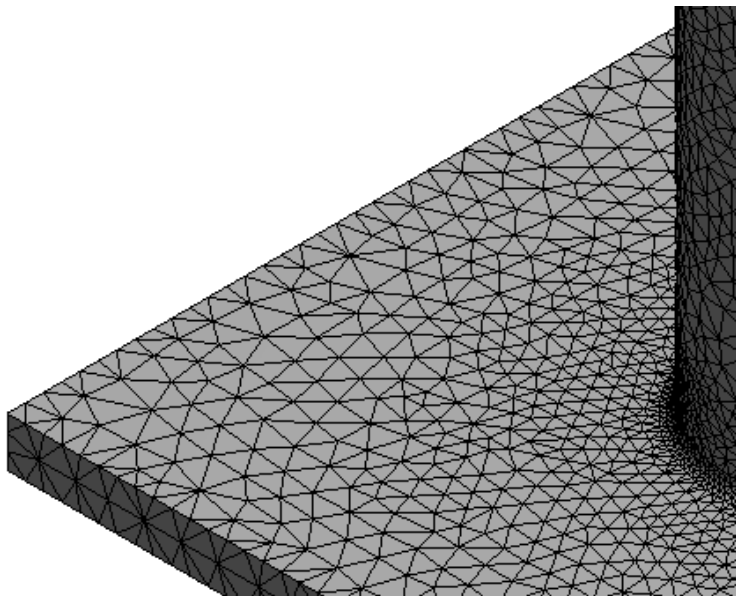
Fuente: Autores

Los valores mostrados en la tabla pueden variar respecto a los resultados finales debido a que los valores promedio se evaluaron en puntos cercanos a los máximos, evitando tomar valores de la singularidad que puede aparecer.

Acorde al estudio de independencia de malla, se realizará la simulación con objetos en forma de tetraedros, con tamaño de 15 mm y a partir de allí se agrega un “Sizing” en el lugar donde se espera que se registren los valores críticos de las variables estudiadas, esto quiere decir que los elementos tendrán un tamaño aún más pequeño en esta sección (5 mm). En las figuras 48, 49 y 50 se muestran tramos de la estructura con el mallado realizado. Esta configuración se tomará para los dos

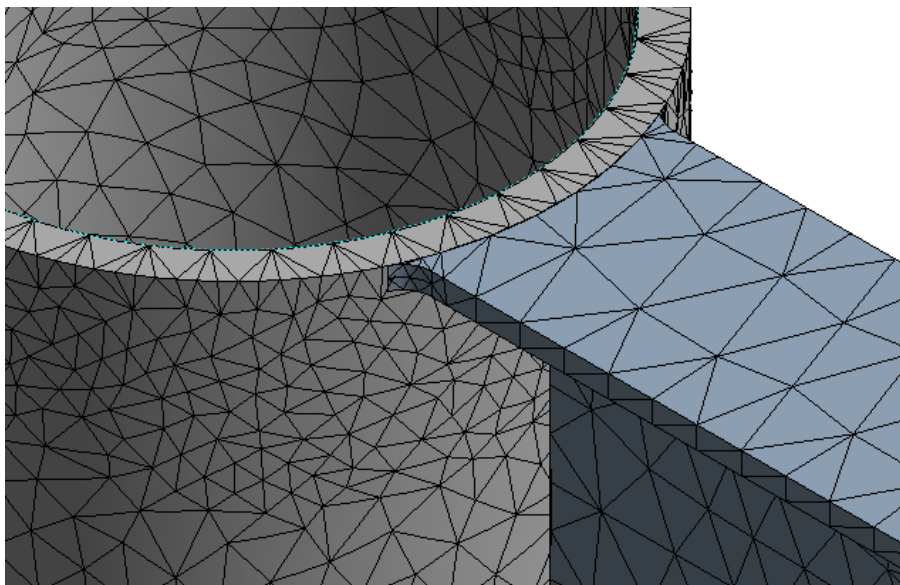
análisis ya que los resultados del estudio fueron similares, la figura 51 muestra la calidad de la malla elegida.

Figura 48. Tramo de malla para simulación



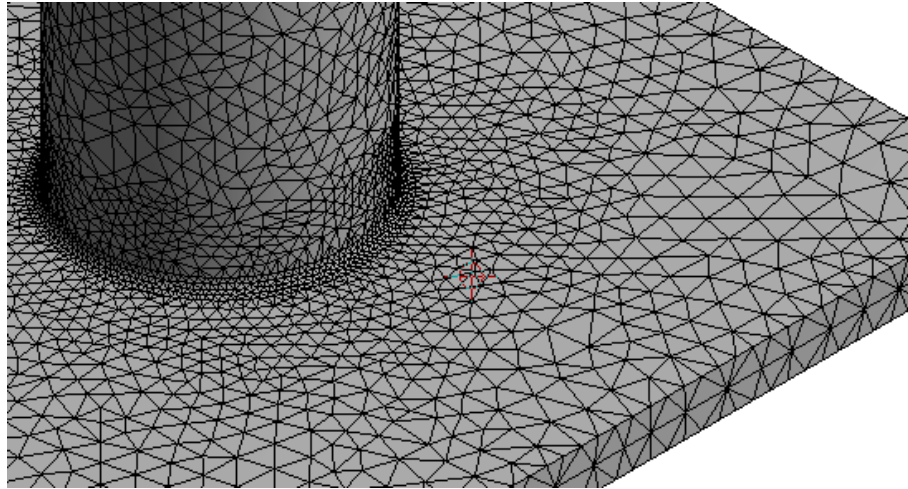
Fuente: Autores

Figura 49. Detalle sizing en mallado conexión con viga



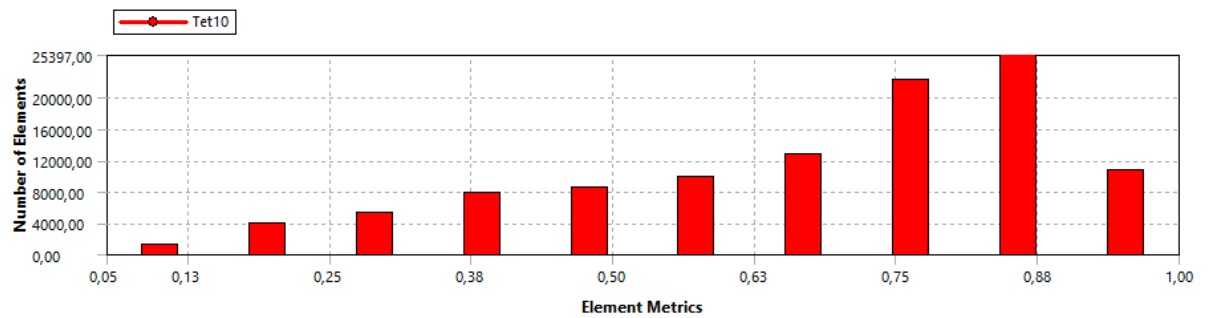
Fuente: Autores

Figura 50. Detalle sizing en mallado base de tubo



Fuente: Autores

Figura 51. Calidad de la malla



Fuente: Autores

## 4.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

### 4.2.1. Pre-proceso

Para los análisis estáticos no es necesario agregar consideraciones más que las de la sección 4.1, pero sí las soluciones que se desean visualizar:

- Esfuerzo máximo
- Deformación total
- Esfuerzo elástico máximo

- Factor de seguridad (agregar la herramienta “Static Tool”)

#### 4.2.2. Simulación y resultados

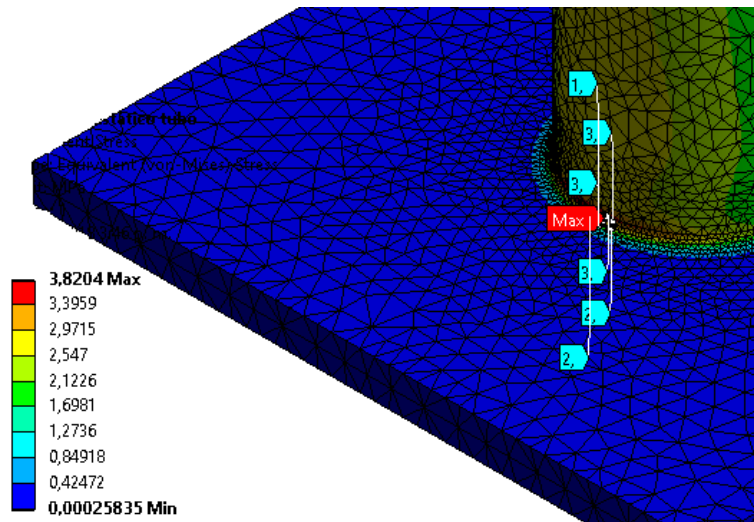
El resumen de los resultados obtenidos se muestra en la tabla 9, y las figuras de la 52 a la 61 la distribución de las variables dentro de la estructura para el tubo y para la viga, respectivamente.

Tabla 9. Resumen de resultados análisis estático

SOLUCIÓN	UNIDAD	VALOR PARA TUBO	VALOR PARA VIGA
Esfuerzo promedio	MPa	2,91	131,16
Deformación total máxima	mm	0,28	15,8
Deformación elástica equivalente máxima	mm/mm	0,0000191	0,923
Factor de seguridad promedio	-	> 15	2,96

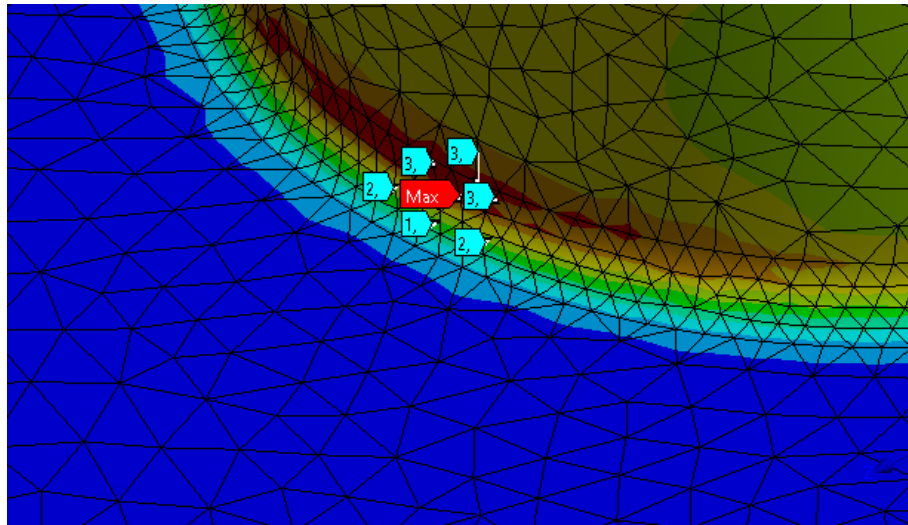
Fuente: Autores

Figura 52. Esfuerzo promedio en tubo - Análisis estático



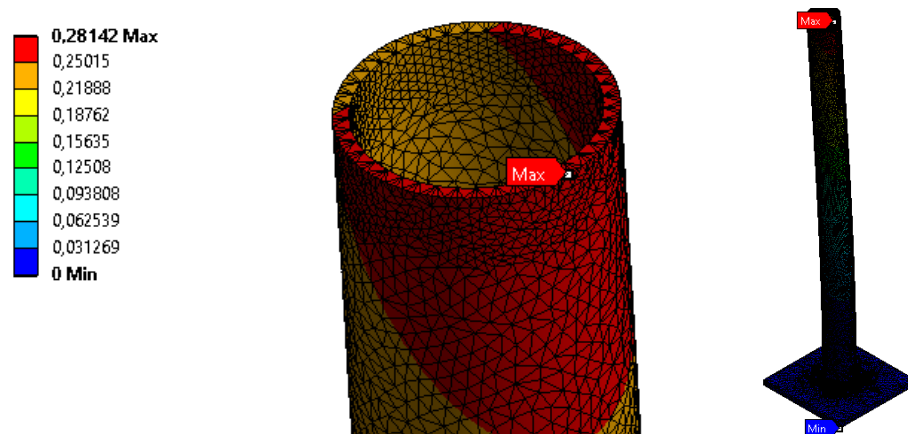
Fuente: Autores

Figura 53. Esfuerzo detalle en tubo - Análisis estático



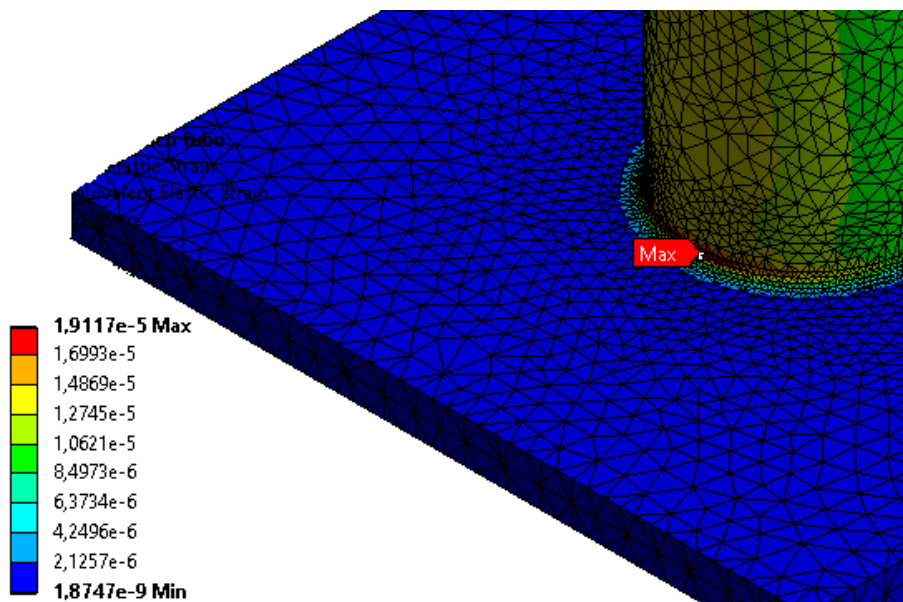
Fuente: Autores

Figura 54. Deformación total máxima en tubo - Análisis estático



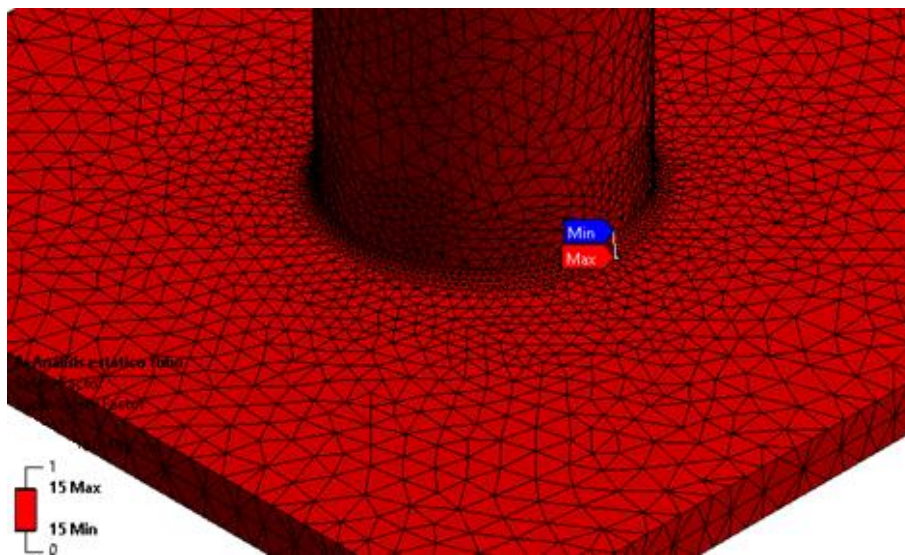
Fuente: Autores

Figura 55. Deformación elástica equivalente en tubo - Análisis estático



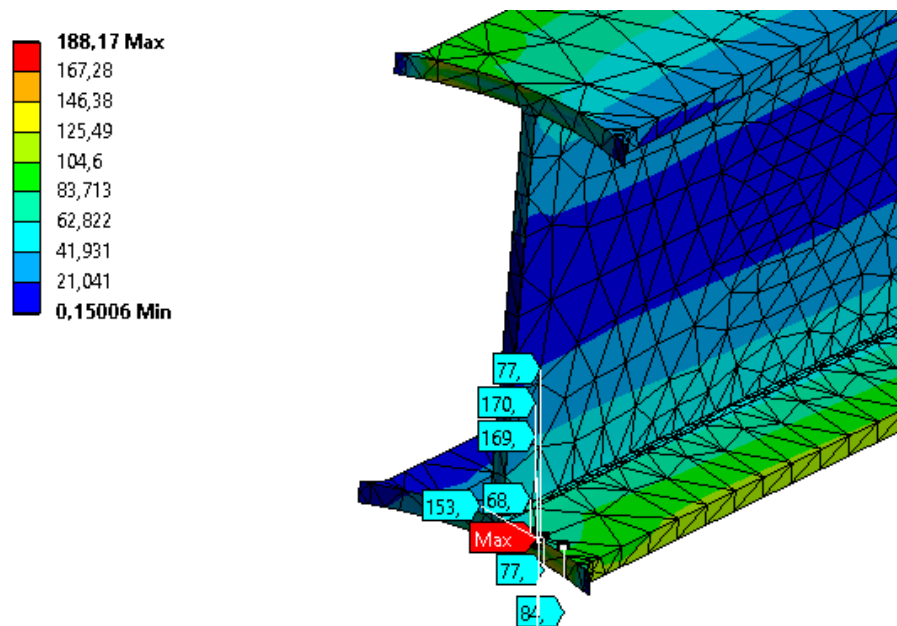
Fuente: Autores

Figura 56. Factor de seguridad promedio en tubo - Análisis estático



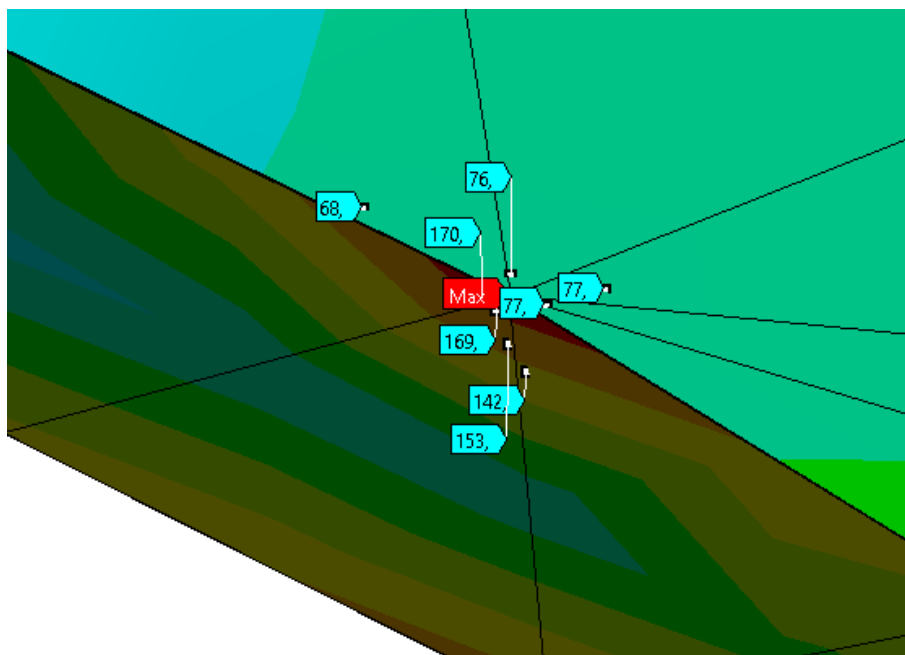
Fuente: Autores

Figura 57. Esfuerzo promedio en viga - Análisis estático



Fuente: Autores

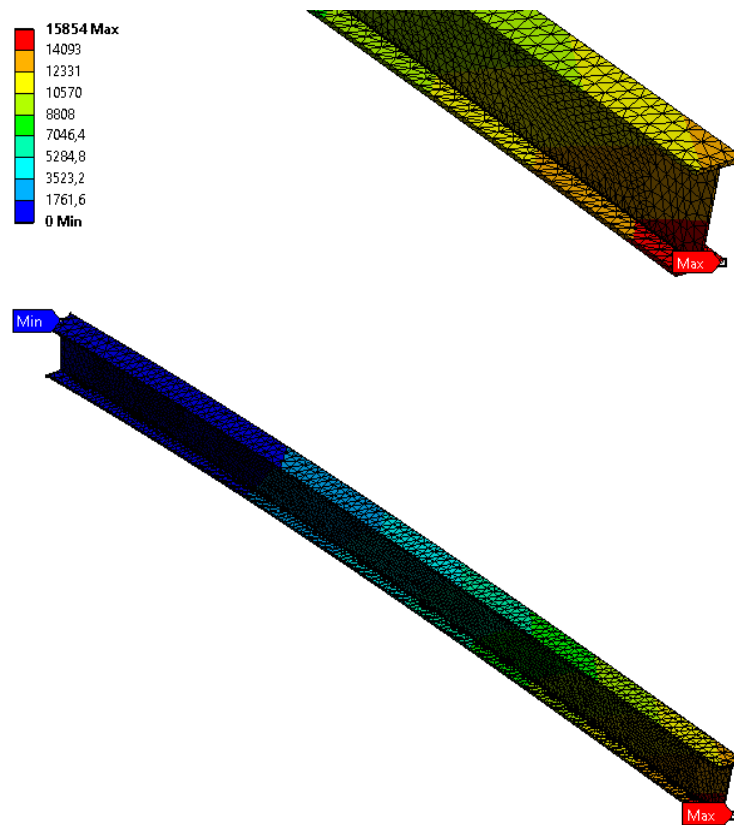
Figura 58. Esfuerzo detalle en viga - Análisis estático



Fuente: Autores

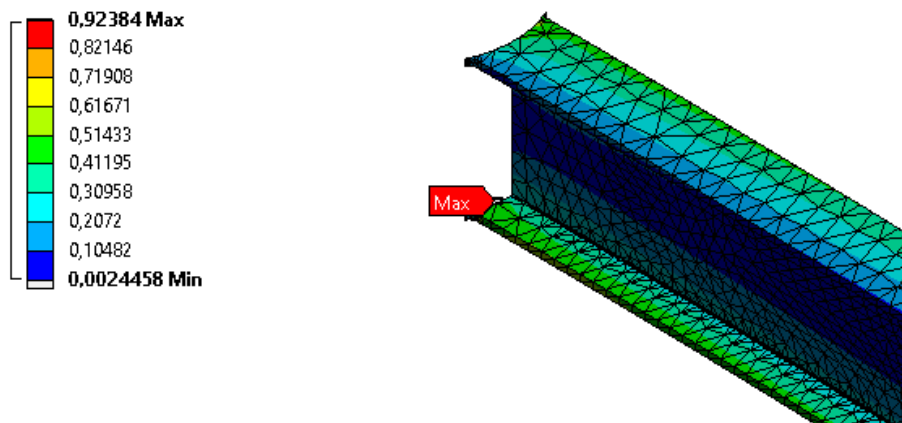


Figura 59. Deformación total máxima en viga - Análisis estático



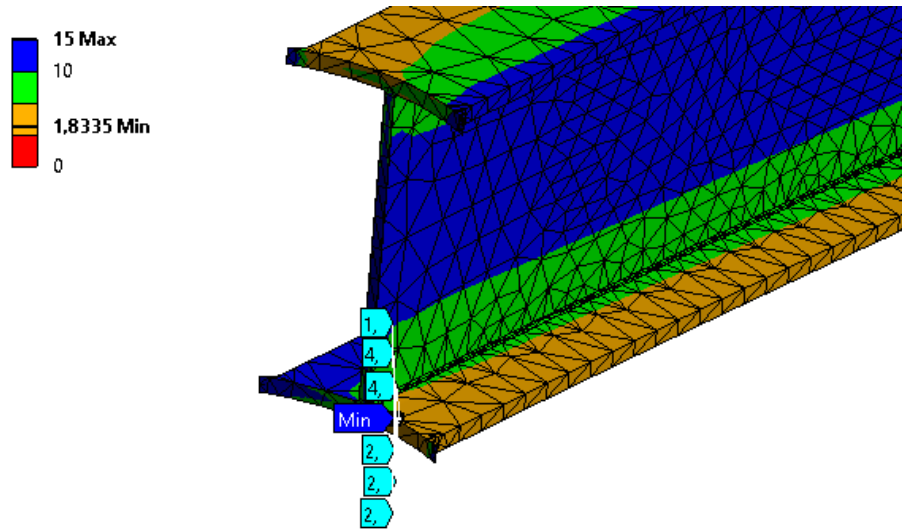
Fuente: Autores

Figura 60. Deformación elástica equivalente en viga – Análisis estático



Fuente: Autores

Figura 61. Factor de seguridad promedio en viga - Análisis estático



Fuente: Autores

#### 4.2.3. Análisis de resultados

Como se evidencia en las figuras anteriores, los esfuerzos máximos y por lo tanto los factores de seguridad mínimos ocurren en la parte inferior del tubo y en la unión entre el tubo y la viga. Se esperaba que los esfuerzos máximos ocurrieran en estos puntos ya que se están estudiando los casos más críticos donde cada elemento soporta toda la carga de manera individual, es importante resaltar que al momento de realizar la simulación con la viga unida al tubo como un solo sólido se identificaba una singularidad que se resolvió con la configuración empleada en la simulación actual y se optó por trabajar con puntos cercanos a los máximos en todos los casos.

El elemento en gran parte no presenta riesgos de falla, por lo que se evidencian factores de seguridad mínimos aceptables para la aplicación, siendo acordes a los resultados obtenidos en los cálculos teóricos.

Las deformaciones evidenciadas en el software son bastante pequeñas y, al igual que en el cálculo teórico, no representan desplazamientos importantes al momento de levantar la carga.

La variación en los resultados puede deberse a problemas en las suposiciones propias del modelo simplificado, así como la naturaleza de la simulación y sus posibles incertidumbres debidas a los factores que la afectan, mencionadas anteriormente. Sin embargo, los resultados de ambos métodos cumplen con las especificaciones exigidas y no debería existir riesgo de falla.

### 4.3. ANÁLISIS POR FATIGA

#### 4.3.1. Pre-proceso

El software da la posibilidad de simular las cargas por fatiga, lo que hace que el proceso sea confiable y sencillo de configurar. Las opciones que se visualizarán serán las mismas que la sección 4.1, aunque para este caso se agregará la herramienta “Fatigue Tool”, donde a su vez de deben agregar las siguientes soluciones:

- Safety factor
- Life
- Biaxiality
- Fatigue sensibility

Al abrir Fatigue Tool, se debe agregar el factor de corrección al límite de fatiga (k) calculado en el capítulo anterior y la teoría de falla elegida para el análisis (Soderberg) y en Safety Factor configurar los ciclos a los que se espera el fallo del componente ( $10^6$ ). Las cargas deben configurarse como repetitivas en una sola dirección dentro de la misma herramienta.

#### 4.3.2. Simulación y resultados

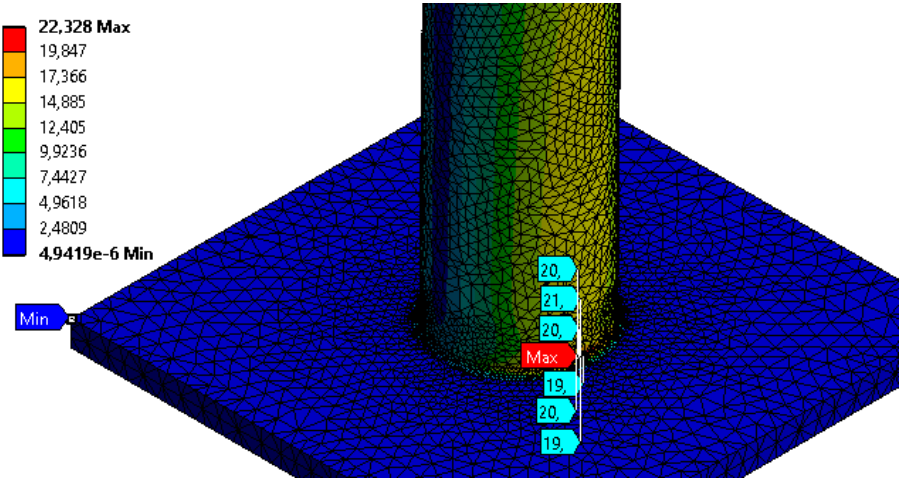
A continuación se presentan los resultados obtenidos, en la tabla 10 el resumen y en las figuras de la 62 a la 79 el comportamiento de las variables en la estructura para los dos análisis.

Tabla 10. Resumen de resultados análisis por fatiga

SOLUCIÓN	UNIDAD	VALOR PARA TUBO	VALOR PARA VIGA
Esfuerzo promedio	MPa	19,83	159,6
Deformación total máxima	mm	2,37	16,64
Deformación elástica equivalente máxima	mm/mm	0,00011	0,00089
Factor de seguridad promedio	-	11,3	2,1
Vida útil	ciclos	1000000	1658,4
Biaxialidad	-	0,976	0,852
Factor de seguridad promedio por fatiga	-	2,044	0,5

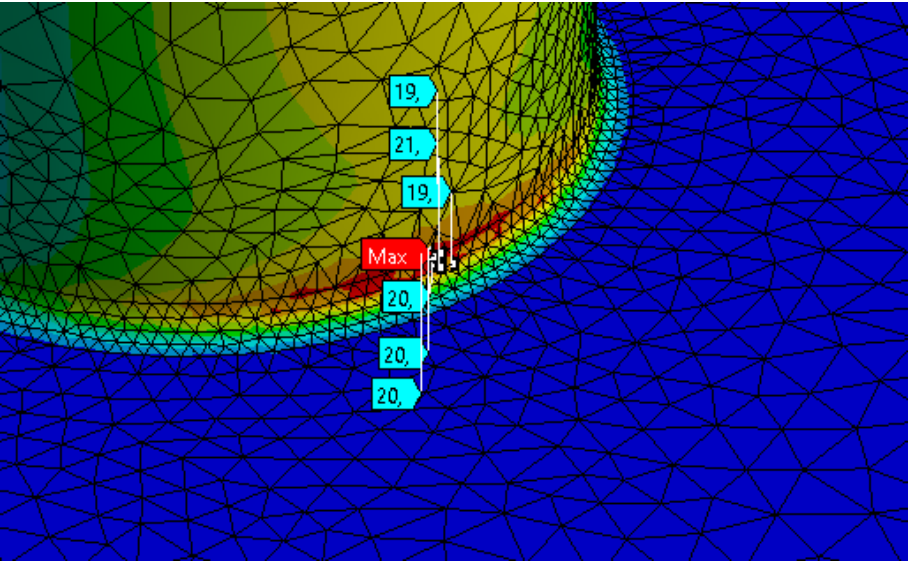
Fuente: Autores

Figura 62. Esfuerzo promedio en tubo - Análisis por fatiga



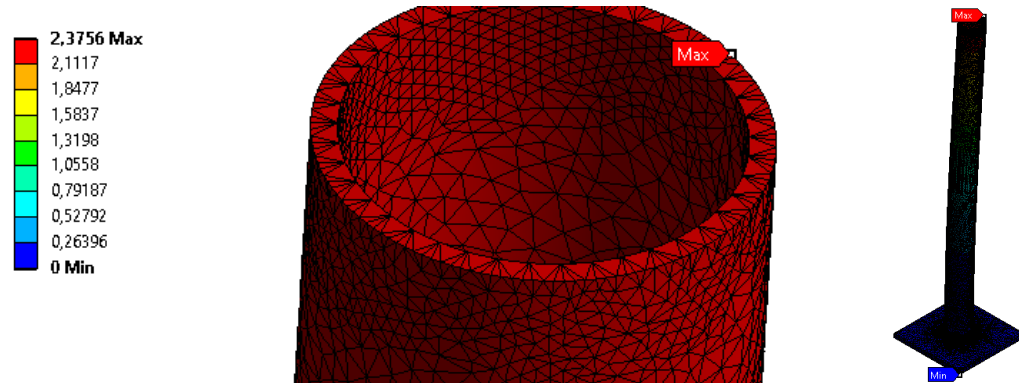
Fuente: Autores

Figura 63. Esfuerzo detalle en tubo - Análisis por fatiga



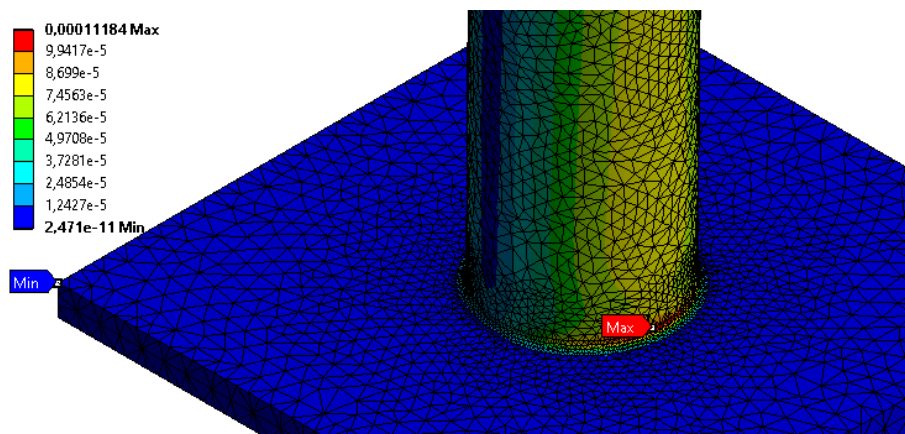
Fuente: Autores

Figura 64. Deformación total en tubo - Análisis por fatiga



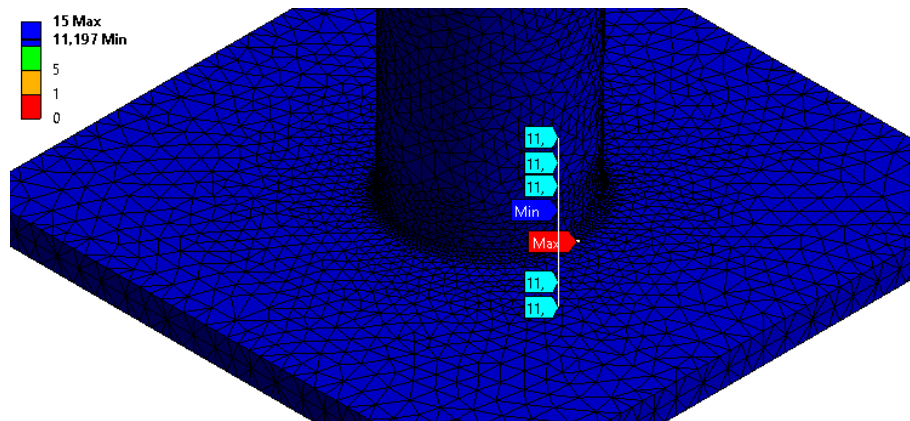
Fuente: Autores

Figura 65. Deformación elástica equivalente en tubo - Análisis por fatiga



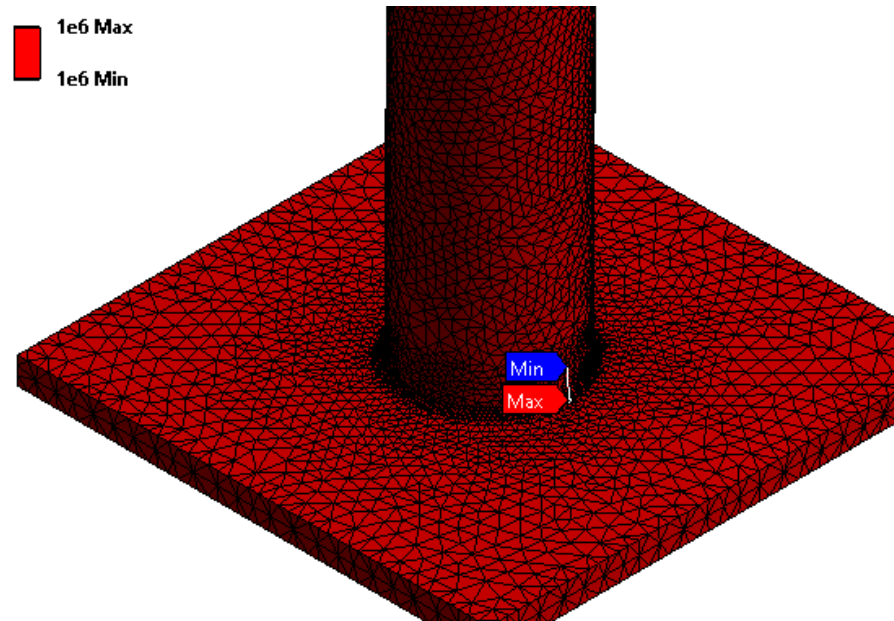
Fuente: Autores

Figura 66. Factor de seguridad promedio en tubo - Análisis por fatiga



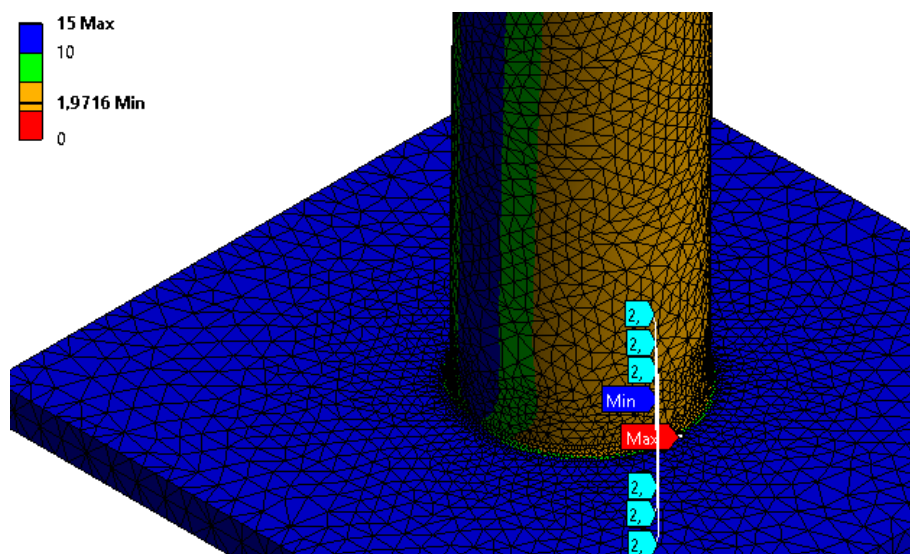
Fuente: Autores

Figura 67. Vida útil en tubo - Análisis por fatiga



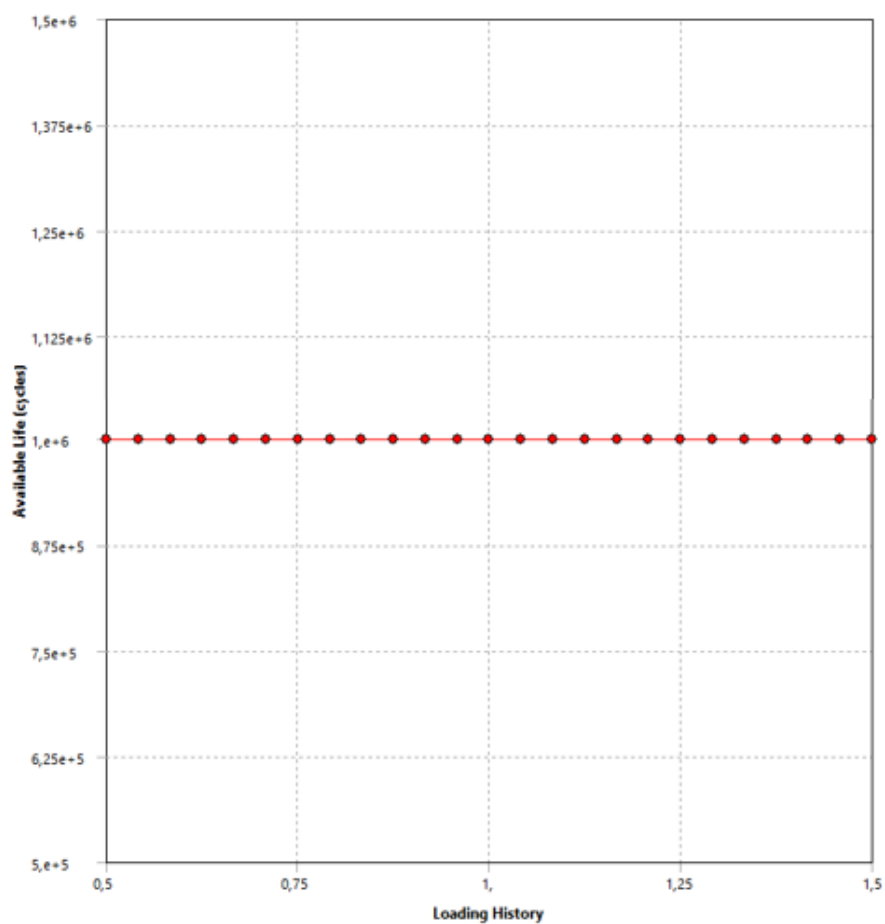
Fuente: Autores

Figura 69. Factor de seguridad por fatiga en tubo - Análisis por fatiga



95

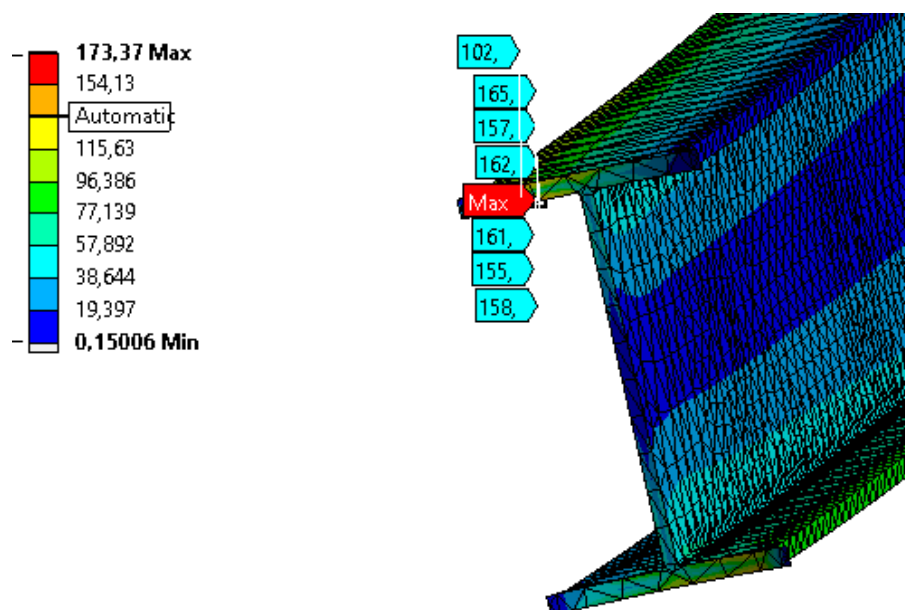
Figura 70. Sensibilidad a la fatiga en tubo - Análisis por fatiga



Fuente: Autores

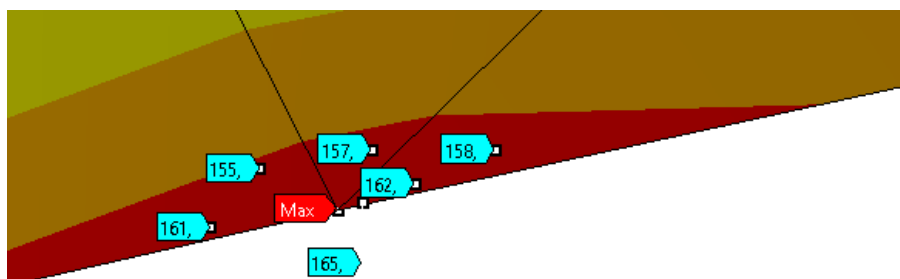


Figura 71. Esfuerzo promedio en viga - Análisis por fatiga



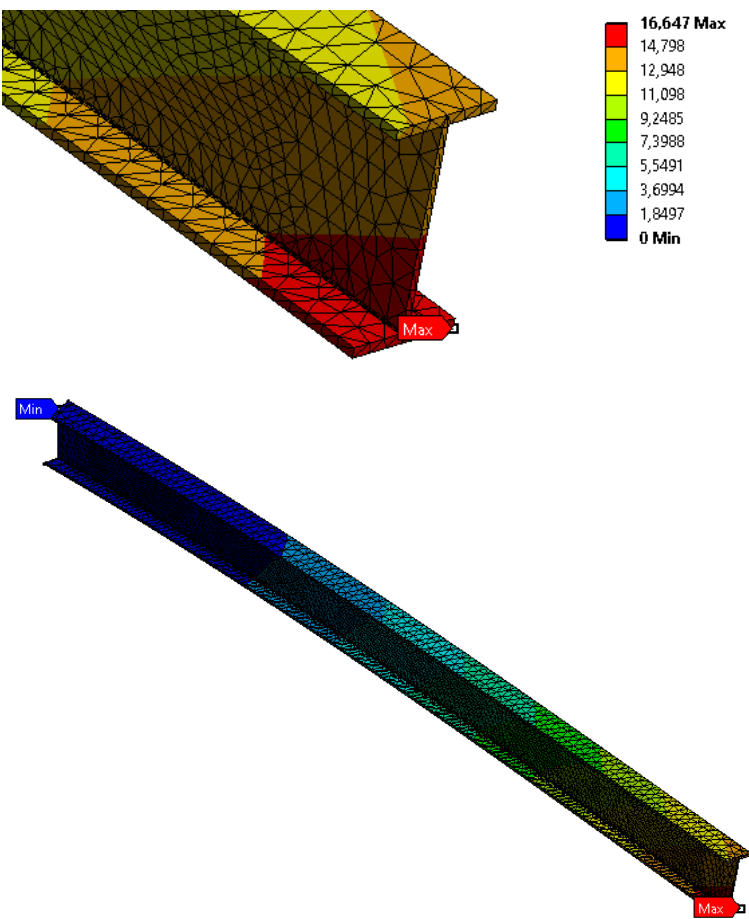
Fuente: Autores

Figura 72. Esfuerzo detalle en viga - Análisis por fatiga



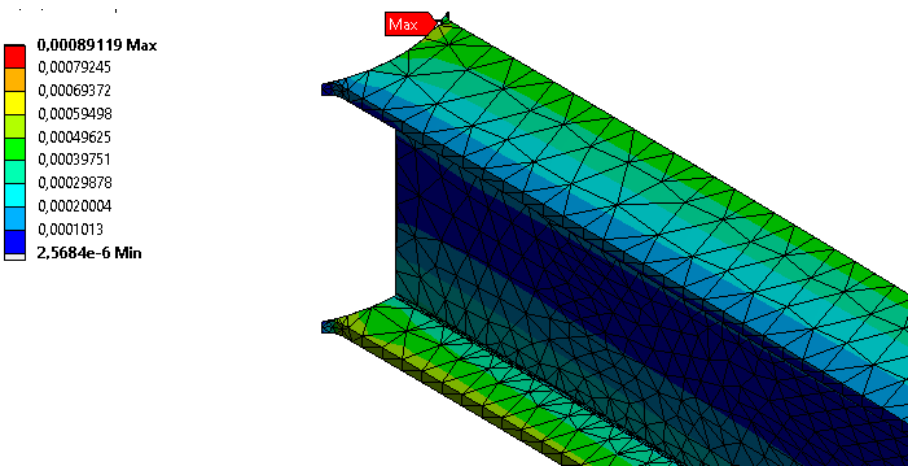
Fuente: Autores

Figura 73. Deformación total máxima en viga - Análisis por fatiga



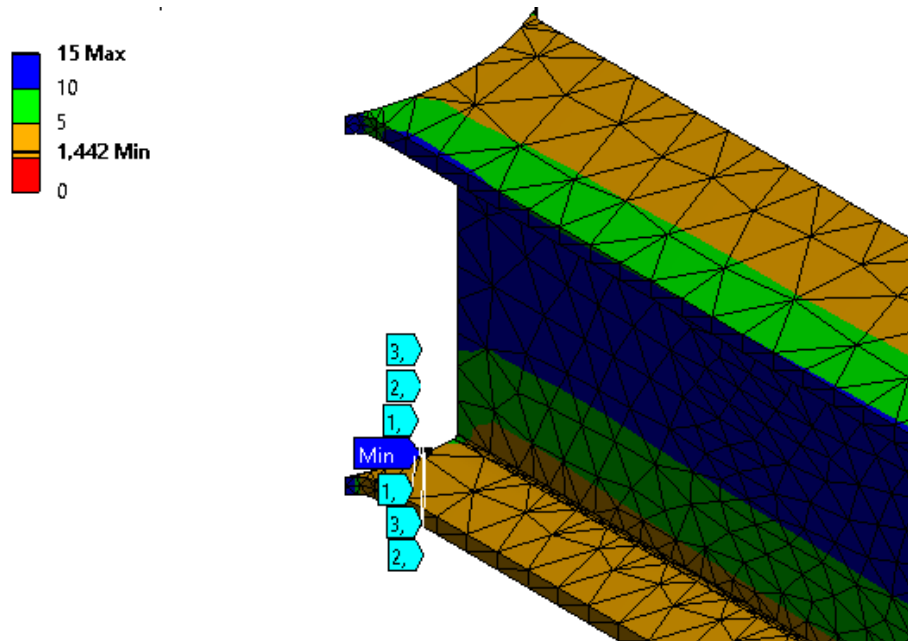
Fuente: Autores

Figura 74. Deformación elástica equivalente en viga - Análisis por fatiga



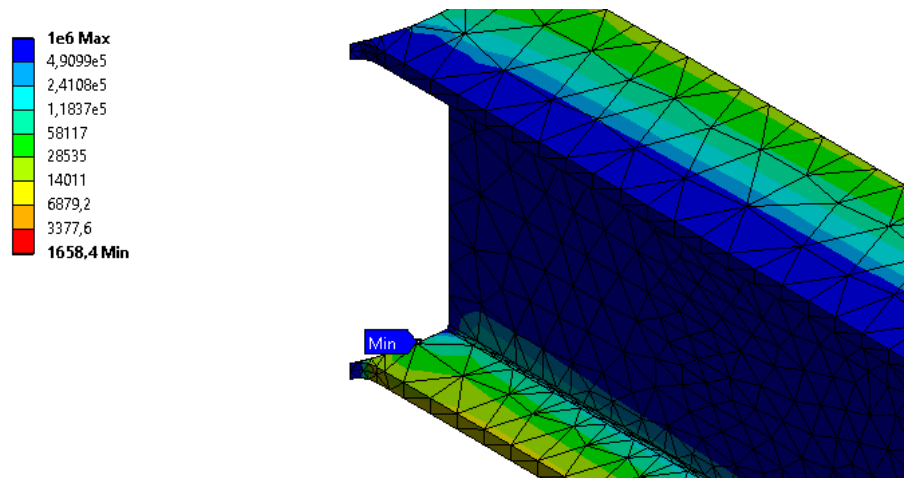
Fuente: Autores

Figura 75. Factor de seguridad promedio en viga – Análisis por fatiga



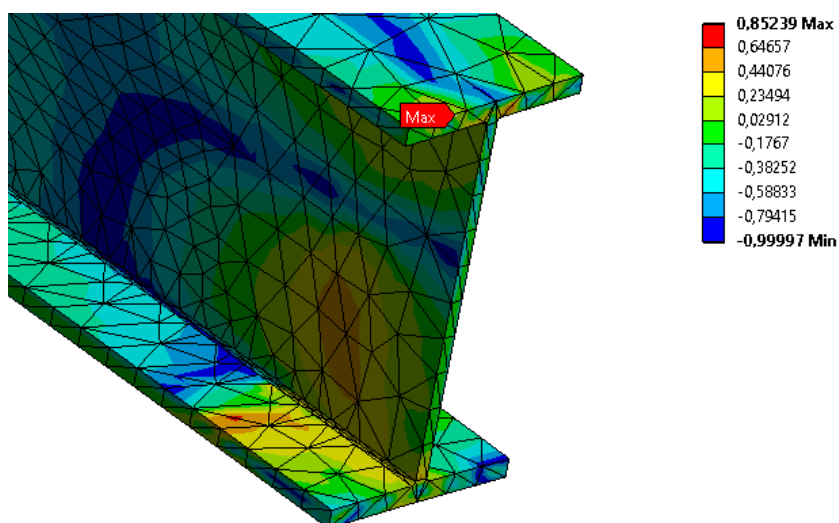
Fuente: Autores

Figura 76. Vida útil en viga - Análisis por fatiga



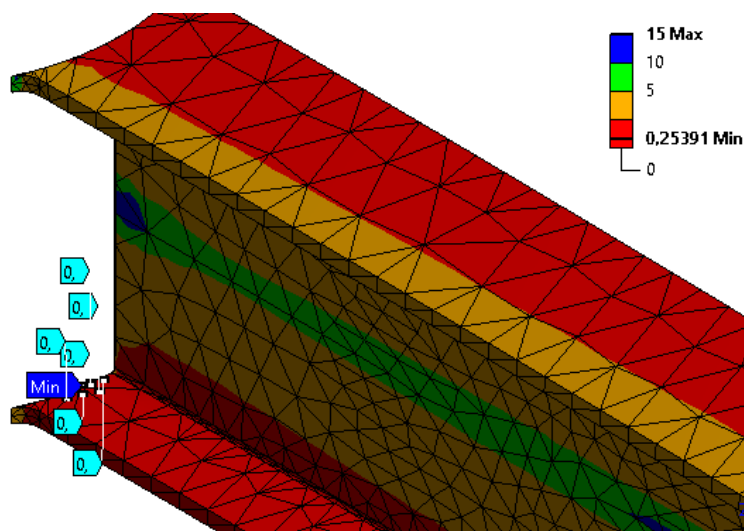
Fuente: Autores

Figura 77. Biaxialidad en viga - Análisis por fatiga



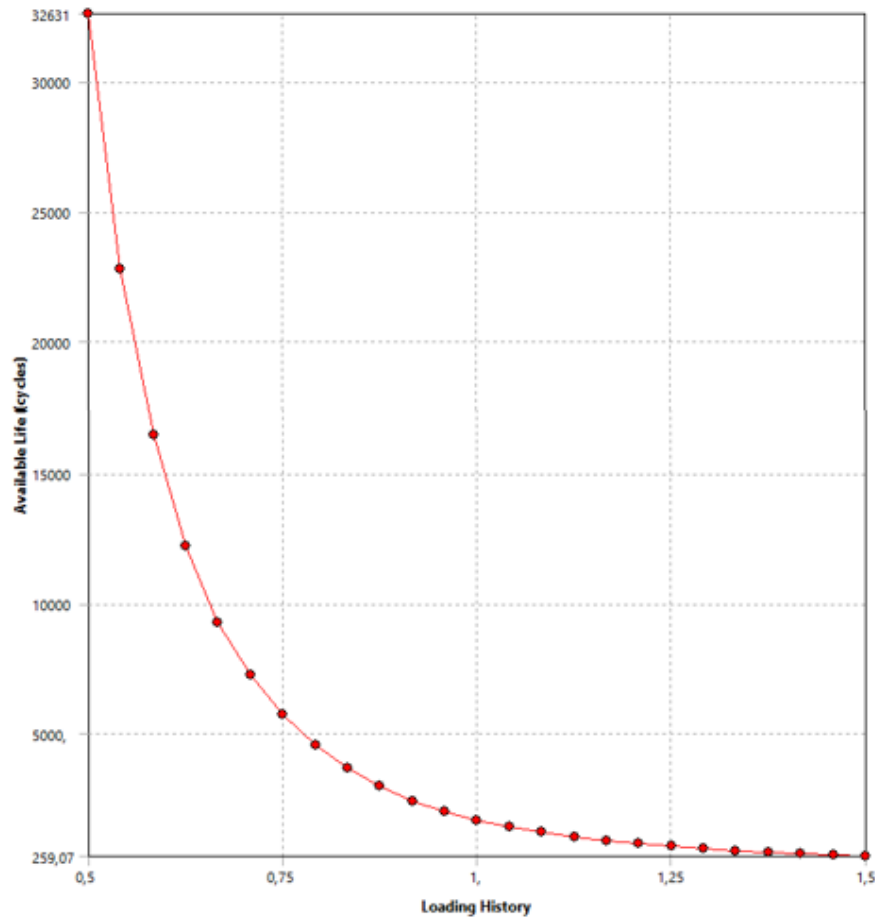
Fuente: Autores

Figura 78. Factor de seguridad por fatiga en viga - Análisis por fatiga



Fuente: Autores

Figura 79. Sensibilidad a la fatiga en viga - Análisis por fatiga



Fuente: Autores

#### 4.3.3. Análisis de resultados

Los puntos más críticos para la fatiga en los elementos ocurren, al igual que en el análisis anterior, en el extremo base del tubo y donde este se une con la viga, allí es donde se realiza el análisis más riguroso, siguiendo con la decisión de analizar puntos cercanos para evitar la singularidad presentada con la geometría completa. El resto del elemento no presenta peligro de falla debido a la inexistencia de concentradores de esfuerzos.

Los factores de seguridad a la fatiga obtenidos en los puntos críticos desde el software son bastante bajos e incluso en la vida útil del elemento se evidencia que la viga fallaría después de 1000 ciclos. Sin embargo, como ya se mencionó, los resultados obtenidos en la simulación pueden verse afectados por la simplificación

del modelo, el material con el que simuló ya que no es el utilizado para la construcción, las configuraciones de las fuerzas y soportes ya que se asumen los casos más conservadores donde cada elemento soporta la fuerza total, entre otros factores.

Las demás soluciones añadidas al análisis por fatiga muestran resultados aceptables para concluir que el efecto de biaxialidad obtenido y la sensibilidad a la fatiga no afectarán el diseño.

Es importante recordar que el efecto de fatiga es bastante complejo y que las teorías de falla existentes poseen aproximaciones y estimaciones que puede afectar el comportamiento de los materiales y la interacción del diseño con su entorno.

#### **4.4. PLANOS DE DISEÑO**

Los planos de fabricación de la grúa diseñada se presentan en el anexo C de este documento, donde se evidencia un cambio del perfil de la viga de IPE 160 a IPE 180 para hacerla más robusta, de acuerdo con los requerimientos establecidos por la empresa.

## **5. FABRICACIÓN DE LA GRÚA PESCANTE**

Durante este capítulo se plantean las consideraciones finales para que la grúa diseñada satisfaga la necesidad planteada por la empresa, con un funcionamiento rápido y eficaz, además de mantener la seguridad de los operarios dentro del tren de laminación.

### **5.1. SOBRE EL MONTAJE ESTRUCTURAL DE LA GRÚA**

Para determinar el lugar más conveniente para ubicar la grúa desde el punto de vista de la prevención de riesgos, el diseñador deberá tener en cuenta:

- El medio en que la grúa debe realizar su función: al aire libre o en el interior de un recinto.
- Las condiciones del lugar de trabajo: altura libre sobre otros equipos y materiales, distancia a las cerchas de la nave, existencia de pasos paralelos o concurrentes a su recorrido, presencia frecuente y obligada de personal en las zonas de actividad de la grúa, etc.
- Separaciones mínimas: Todas las partes móviles de la grúa deben estar separadas como mínimo 0,05 m de las partes fijas del edificio; 0,1 m de las barandillas; 0,5 m de las zonas de acceso.
- Deben tenerse también en cuenta las medidas máximas de las cargas a desplazar: para determinar la ocupación del emplazamiento y los riesgos de su movimiento.

Para determinar el equipamiento de las grúas desde el punto de vista de la prevención de riesgos, debe realizarse una evaluación de riesgos por personal capacitado para esta labor. La grúa se monta sobre la placa de montaje siguiendo las instrucciones dadas por el fabricante.

#### **5.1.1. Acometida eléctrica**

Desde el punto de vista de la prevención de riesgos, la instalación eléctrica de las grúas debe reunir los requisitos de seguridad establecidos en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión [29]. Entre otros aspectos, cabe destacar:

- Debe disponer de un interruptor general de desconexión omnipolar, de fácil acceso que no pueda conectarse de forma involuntaria o accidental.
- Debe disponerse de protección contra sobre intensidades
- Debe disponer de protección contra sobre tensiones

- Toda la instalación debe estar protegida contra contactos directos e indirectos

El montaje de la acometida eléctrica para la grúa lo realizará generalmente la empresa propietaria de la máquina o en su caso una empresa autorizada, siguiendo estrictamente las indicaciones que al respecto le haga el fabricante de la grúa.

La grúa pescante diseñada en este trabajo de grado funciona con dos tipos de energía, uno para cada movimiento que esta va a realizar.

El primero es el movimiento giratorio de la grúa que será efectuado de manera manual, es decir, con energía mecánica proporcionada por el operario de la misma, este guiará el equipo y ubicará de manera efectiva para la labor que debe cumplir.

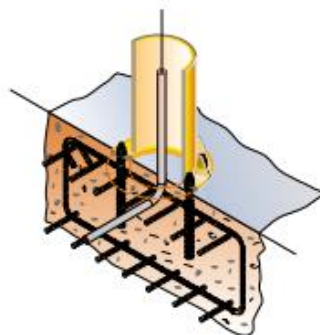
El segundo movimiento es el de levantar verticalmente la carga y será realizado con ayuda de un polipasto eléctrico. Para proporcionar la energía requerida, se necesita una extensión desde el tomacorriente hasta la grúa con un voltaje 220 V nominales además de una protección especial para el equipo en caso de una sobrecarga. Es importante recordar que el uso de la grúa es de respaldo o emergencia, por lo tanto, no es necesaria la construcción de una red eléctrica independiente para su uso.

### 5.1.2. Fijación

Al momento de instalar una estructura, es necesario evaluar el terreno en el cual se fijará y dependiendo de sus propiedades, seleccionar la manera de anclaje para asegurar un correcto funcionamiento.

- Cimentación con tornillos de anclaje: la forma más usual de fijación de las grúas pescante de columna es mediante varillas de anclaje. Estas varillas se empotran en una cimentación de hormigón [30]. Ver figura 80.

Figura 80. Esquema de cimentación con tornillo de anclaje

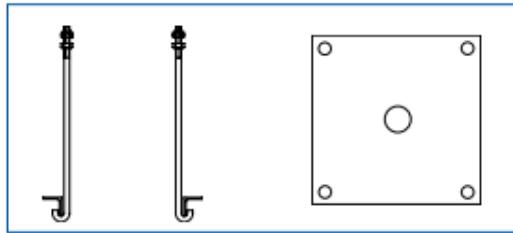


Fuente: ABUS [30]



- Fundamento con anclajes ideales: los anclajes ideales ofrecen una alternativa inteligente de fijación, cuando la ubicación posterior de la grúa deba quedar accesible y permitir el paso por ella sin obstáculos. Las varillas de anclaje partidas en dos se unen entre sí con unas vainas. Para la fijación de la grúa se atornillan pernos roscados en las vainas [30]. Ver figura 81.

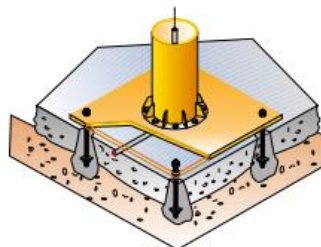
Figura 81. Esquema de anclajes ideales



Fuente: DEMAG [31]

- Placa intermedia sobre una cimentación de hormigón: mediante una placa intermedia cuadrada se puede realizar la fijación sobre una cimentación de hormigón existente y adecuado. Una vez perforado y rebajado el suelo se insertan los anclajes y se vierte hormigón [30]. Ver figura 82.

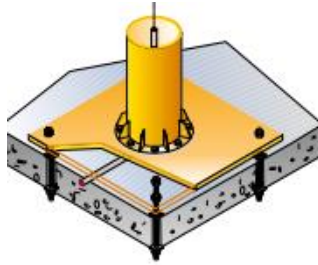
Figura 82. Esquema de placa intermedia sobre hormigón



Fuente: ABUS [30]

- Placa intermedia sobre forjado de hormigón: como alternativa, se puede montar la placa intermedia sobre un forjado de hormigón adecuado con anclajes que lo atraviesan [30]. Ver figura 83.

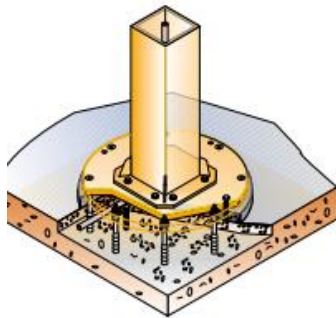
Figura 83. Esquema placa intermedia sobre forjado de hormigón



Fuente: ABUS [30]

- Placa intermedia redonda con tacos químicos sobre un pavimento o forjado de hormigón: mediante anclajes químicos, para cargas dinámicas, se monta primero una placa de tacos, a la que después se atornilla la base de la columna de la grúa [30]. Ver figura 84.

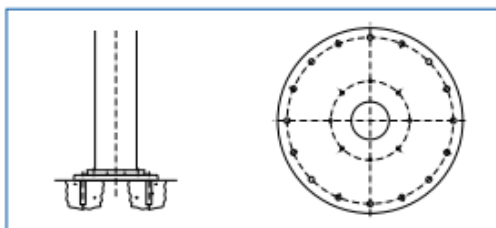
Figura 84. Esquema de placa intermedia con tacos químicos



Fuente: ABUS [30]

- Fijación mediante tacos: sirven para montar pescantes giratorios de columna, encima del suelo de hormigón existente [31]. Ver figura 85.

Figura 85. Esquema de fijación mediante tacos



Fuente: DEMAG [31]

## **5.2. SOBRE EL POLIPASTO**

### **5.2.1. Instalación**

Se deberá cumplir con los procedimientos de instalación recomendados en el manual. Como el polipasto está suspendido de un monorriel, o un carro y una grúa, y la carga nominal de cada una de estas piezas del equipo es diferente, la carga nominal para el sistema que utiliza esta combinación de equipo, debe estar basada en la carga nominal mínima más baja de cualquier pieza individual del equipo o estructura dentro del sistema [32].

### **5.2.2. Ubicación**

El polipasto será instalado en ubicación despejada y libre de carga que permitan el movimiento del operador.

Los controles colgantes del polipasto eléctrico serán ubicados a un nivel adecuado sobre el piso de operaciones. Por recomendación de la norma ASME B30.16 “Los polipastos eléctricos o de aire, no deben ser instalados donde el gancho de la carga pueda descender más del recorrido del gancho nominal bajo condiciones normales de operación, a menos que el polipasto esté equipado con un dispositivo limitador de descenso”<sup>2</sup>. Como la grúa pescante estará ubicada en medio de dos cajas de laminación la cadena de la carga del polipasto que está floja, puede representar un peligro, ya que se corre el riesgo de enganchar las alargaderas en movimiento, por esto se instalará un soporte para cadenas recomendado por el fabricante del polipasto o una persona calificada [32].

### **5.2.3. Dirección del movimiento**

Los motores polifásicos deben estar conectados a las líneas de suministro de energía de tal manera que el movimiento del gancho coincida con las marcas de control. Para lograr esto, no se deben cambiar las conexiones internas del polipasto o el cableado de las estaciones colgantes. Si fuera necesario, la inversión de fase (motor de inversión) debe ser realizada invirtiendo los conductores de energía a la unidad de elevación [32].

---

<sup>2</sup> ASME - American Society of Mechanical Engineers. Norma ASME B30.16. New York, USA. 2017

### **5.3. PROCESO DE FABRICACIÓN**

#### **5.3.1. Adecuación de tubo y solicitud elementos externos**

Desde el tren de laminación se debe pasar una solicitud formal al área comercial para la realización de pedidos y trámites pertinentes para obtener dichos elementos de la grúa.

Así mismo se deben realizar los trámites con el personal de intendencia para obtener el tramo de tubería con la que se construirá la columna de la grúa, a la cual se le debe realizar una adecuación que servirá como base de esta.

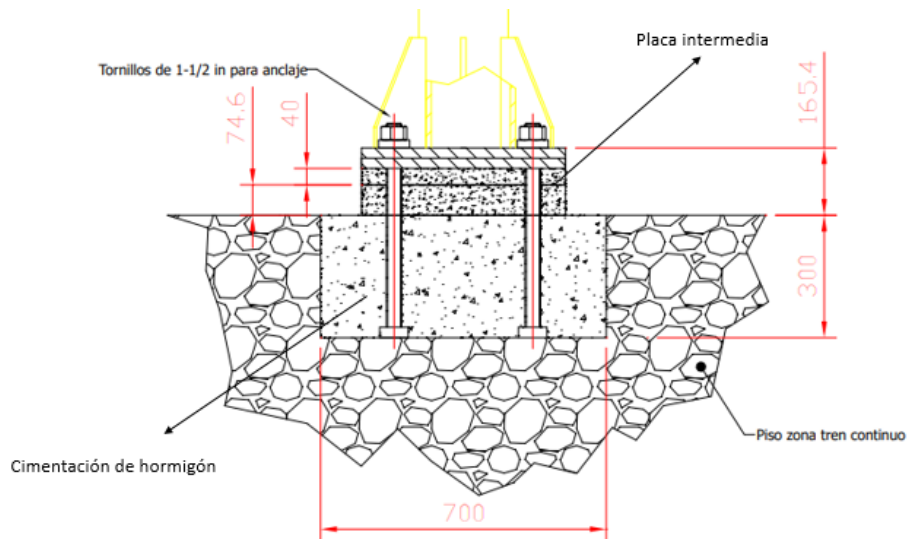
#### **5.3.2. Ensamble de partes**

Es necesario realizar el ensamble de las partes para la puesta en parcha ya que, al comprar de manera independiente los elementos que componen la grúa, el personal de la empresa es quien realiza esta labor y no existe un fabricante que haga la instalación como en otros casos.

#### **5.3.3. Fijación**

Para la instalación de la grúa diseñada en este proyecto, se optó por una placa intermedia sobre una cimentación de hormigón, debido a que es más sencillo y efectivo en la aplicación requerida. Para este caso en particular la cimentación de hormigón se elaboró al mismo nivel del piso del tren continuo, como se muestra en la figura 86, ya que así se evitan riesgos de tropiezo y caídas del operario que accionaría la máquina.

Figura 86. Esquema de la cimentación de la grúa pescante



Fuente: Archivo Ternium Siderúrgica de Caldas [2]

Para el anclaje de la grúa pescante, se realiza una obra civil donde se perfora a una profundidad de 300 mm y 700 mm de ancho en el piso del tren de laminación. En este se vaciará cemento gris y se dejará sobresalir los tornillos de anclaje de 1 ½ in a una longitud de 530 mm. Después del cemento gris vendrá una capa de Sika Dur 32 de 114,6 mm y una placa de acero como se muestra en el esquema de la figura 86.

Para esta obra civil se cotizaron cinco bultos de arena, cinco bultos de gravilla, un bulto de cemento gris y un kilo de Sika Dur 32. En esta cotización no se tiene mano de obra, ya que la obra se realizará con personal propio de intendencia. Los materiales tendrán un costo de \$129.499 incluyendo IVA mostrado en la tabla 11.

Tabla 11. Cotización de materiales para anclaje grúa pescante

<b>FERRETERIA LAS MERCEDES</b>			
<b>Nit. 75033448-0</b>			
Cliente: TERNIUM SIDERURGICA DE CALDAS			
<b>CANT.</b>	<b>DETALLE</b>	<b>VR. UNITAR</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
1	BULTO DE CEMENTO GRIS	20.168	20.168
5	BULTOS DE ARENA	3.000	15.000
5	BULTOS DE GRAVILLA	3.000	15.000
1	KILO SIKA DUR 32	58.655	58.655
SUBTOTAL			108.823
IVA			20.676
TOTAL			129.499

Fuente: Autores

En las siguientes figuras (87, 88, 89) se muestran las tres fases principales del proceso de fabricación del anclaje para la grúa pescante. Las imágenes muestran el proceso de excavación; la ubicación de los pernos de anclaje y placa de acero; y por último el vaciado del cemento gris y Sika Dur 32. En este proceso el cemento se vacía con un acelerante para que su proceso de secado solo sea de 72 horas y obtener las propiedades necesarias.

Figura 87. Perforación para anclaje de grúa pescante



Fuente: Autores

Figura 88. Ubicación de pernos y placa para anclaje de grúa pescante



Fuente: Autores

Figura 89. Vaciado cemento gris y SIKA DUR 32 para anclaje



Fuente: Autores

#### **5.3.4. Ubicación de accesorios**

Para que la grúa funcione de manera óptima se deben instalar los elementos de izaje respectivos como son polipasto, cadenas y carro para sostener el polipasto, además de los accesorios con los que estos cuentan. Debido al presupuesto del proyecto, desde la empresa se cambió de un polipasto eléctrico (con el que inicialmente se realizó el análisis funcional) a un polipasto manual conocido como malacate ya que se consideró que facilita la operación de la grúa diseñada en el espacio reducido donde será ubicada y no es necesaria la instalación de acometidas eléctricas que se mencionan en la sección 5.1.1.

#### **5.3.5. Puesta en marcha**

El montaje final de la grúa se muestra en las figuras 90 y 91. Las pruebas de funcionamiento se realizan en compañía de supervisores de planta y personal de mantenimiento. La responsabilidad del proceso de fabricación en su totalidad fue asumida por Ternium Siderúrgica de Caldas y la información técnica generada en este proyecto fue validada previamente con el área de ingeniería.



Figura 90. Montaje final de la grúa



Fuente: Autores

Figura 91. Grúa con alargadera



Fuente: Autores

## 5.4. RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO

Al momento de la instalación de la grúa se deben lubricar los pernos y apretarlos por etapas. Las operaciones de servicio y mantenimiento de la grúa pescante se deben realizar con regularidad. El estándar CSA CAN / CSA - B167 (Estándar de seguridad para mantenimiento e inspección de grúas aéreas, grúas de pórtico, monorraíles, polipastos y carros) especifica los requerimientos mínimos para estas actividades.

Siempre es importante [34]:

- Utilizar piezas originales durante los trabajos de reparación
- Usar herramientas adecuadas para cada objetivo
- Llevar indumentaria de protección
- Registrar todas las operaciones y reparaciones en el libro de registro del equipo
- La tarea debe ser realizada por un inspector capacitado para ello.
- Los componentes críticos y los criterios de inspección deben estar identificados con anterioridad por el fabricante de la grúa.

El mantenimiento de la grúa puede ser preventivo o correctivo y preferiblemente debe realizarse de la manera recomendada por el fabricante. El mantenimiento preventivo consiste en realizar reparaciones o cambios de piezas en intervalos de tiempo para evitar que la grúa falle en un momento inesperado y es preferible por encima del mantenimiento correctivo, que se realiza cuando la grúa pierde su capacidad de operación y se debe recuperar dicha condición.

Mantenimiento preventivo:

Se distinguen las revisiones previas o de inicio de labores, las revisiones periódicas y las revisiones generales. Estas se diferencian entre sí por la frecuencia con que se realizan y el detalle de las tareas que las componen.

Revisiones previas o de inicio de labores: se realizan antes de empezar a utilizar el equipo y se deben reparar de inmediato los problemas que se encuentren si es posible o reportarlos para programar su reparación, es importante chequear aspectos como:

- Ajuste y estado de pernos y tornillos
- Grietas en la estructura
- Esquema de movimiento
- Paradas de emergencia

Antes de su uso inicial, para todos los equipos nuevos o que lleven algún tiempo sin usar, se deben probar los siguientes componentes:

- Deflexiones de la grúa producida por sus propios componentes
- Capacidad para la realización de movimientos
- Funcionamiento de interruptores en general
- Perfecto estado de frenos y sistemas de alerta

Las revisiones mencionadas anteriormente se pueden realizar con intervalos de tiempo mayores dependiendo del uso que se le da al equipo y con criterio experto, como se muestra en la tabla 12 [35]:

Tabla 12. Frecuencia de las inspecciones operacionales basadas en la clase de servicio

CLASE DE SERVICIO	FRECUENCIA
A + B	Por lo menos mensualmente
C + D	Por lo menos semanal a mensual
E + F	De diario a semanal
Especial	Según lo recomendado por una persona calificada

Fuente: Implantación RCM en grúas pórtico [35]

- Clase A: Servicio de reserva o poco frecuente
- Clase B: Servicio liviano
- Clase C: Servicio moderado
- Clase D: Servicio pesado
- Clase E: Servicio severo
- Clase F: Servicio severo continuo
- Servicio especial

Para el caso específico del tren de laminación en la empresa de interés de este proyecto, la grúa tiene un servicio poco frecuente ya que se trata de un equipo diseñado para cuando los puentes grúa principales se encuentran ocupados y es necesario cambiar las almohadillas de las cajas laminadoras.

Revisiones periódicas: se toman medidas necesarias para que la grúa funcione en óptimas condiciones, normalmente las reparaciones son aquellas que no se pueden

corregir de manera inmediata durante una inspección previa por falta de materiales o herramientas.

Al igual que las revisiones anteriores, la frecuencia de la inspección depende del tipo de servicio que preste la grúa, como se muestra en la tabla 13:

Tabla 13. Frecuencia de las inspecciones periódicas basadas en la clase de servicio

CLASE DE SERVICIO	FRECUENCIA
A + B	Por lo menos anualmente
C + D	Por lo menos semestral
E + F	Al menos trimestralmente
Especial	Según lo recomendado por un ingeniero profesional o el fabricante
Fuera de servicio	Antes de ser devuelto al servicio

Fuente: Implantación RCM en grúas pórtico [35]

Normalmente dentro de una inspección periódica se debe poner atención a los siguientes aspectos:

- Acristalamiento, rayado o contaminación en frenos eléctricos y mecánicos
- Tornillos sueltos o soldadura agrietada
- Elementos móviles desgastados o deformados
- Daños visibles en ganchos y seguros del mismo
- Desgaste o afectación del cable del polipasto, cadena de carga u otros componentes de izaje
- Conducción de señales apropiada

Revisiones generales: en las revisiones generales se debe prestar especial atención a los problemas que no se pudieron solucionar durante las revisiones previas a la grúa. Cuando el potencial teórico de utilización para el cual fue diseñada la grúa (establecido por el fabricante) ha sido “consumado”, existe un peligro que puede crecer de manera importante.

Este potencial teórico en horas de vida útil se ve influido principalmente de las solicitaciones reales de carga y los periodos de funcionamiento seguro. Para que la

grúa aún no sea necesario revisarla, el cociente entre las solicitudes reales y el potencial teórico debe ser menor a uno, es decir:

$$PFS = S/D < 1 \quad (65)$$

Cuando  $PFS > 1$  se debe programar una revisión general para poder utilizar la grúa de manera segura [36].

#### Mantenimiento correctivo:

Está motivado por las averías que hacen que el equipo tenga que ser puesto fuera de servicio o tenga condiciones que hacen inseguro su uso. La reparación de los daños debe hacerse de manera inmediata y preferiblemente por el propio fabricante o personal capacitado para dicha labor.

A continuación, se muestra la tabla 14 con un estimativo de las revisiones que se le deben realizar a la grúa pescante diseñada en este trabajo y su frecuencia, lo que implica parar la máquina para su realización.

Tabla 14. Frecuencia de revisión para mantenimiento correctivo

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN DE OPERACIÓN	FRECUENCIA
Grúa en general	Inspección visual	Antes de utilizar
Grúa en general	Revisión de señales y sistemas de emergencia	Antes de utilizar
Elementos móviles	Revisión de lubricación	Antes de utilizar
Pernos y tornillos	Revisión de ajuste, cambio si es necesario	Mensual
Rodamientos	Revisión de estado general, cambio si es necesario	Mensual
Soldadura	Revisión de estado general, reparación	Semestral
Estructura	Revisión de estado general, reparación	Semestral
Elementos de izaje	Revisión del estado general, cambio si es necesario	Anual
Anclaje	Revisión de estado general de la base de la grúa	Anual

Fuente: Autores

### 5.4.1. Polipasto

Antes del uso inicial, todos los polipastos nuevos, alterados o modificados deben ser inspeccionados por una persona designada para verificar los ítems que se van a mencionar. Los procedimientos de inspección para polipastos en servicio regular están divididos en dos clasificaciones generales, basadas en los intervalos en los cuales se debe realizar la inspección. Los intervalos a su vez dependen de la naturaleza de los componentes críticos del polipasto y el grado de su exposición al uso, deterioro, o mal funcionamiento [32]. Las dos clasificaciones generales aquí designadas como frecuente y periódica, con intervalos respectivos entre inspecciones se definen a continuación:

Inspección frecuente:

Inspecciones visuales efectuadas por el operador u otra persona designada con registros no requeridos:

- Servicio normal - mensual
- Servicio pesado - semanal a mensual
- Servicio severo - diaria a semanal

Una persona designada debe determinar si las condiciones encontradas durante la inspección constituyen un riesgo y si se requiere otra inspección más detallada. Se deben inspeccionar los siguientes ítems:

- Los mecanismos para una operación adecuada, ajustes apropiados y ruidos inusuales.
- Dispositivo limitador superior de polipastos eléctricos o de aire, sin carga en el gancho al inicio de cada turno. Se debe tener mucho cuidado. El bloque de carga debe avanzar lentamente en su dispositivo limitador u operar a una baja velocidad, en polipastos de velocidad múltiple o variable.
- Un adecuado funcionamiento del sistema de frenado del polipasto.
- Líneas, válvulas y otras partes del sistema de aire, para prevenir cualquier fuga.
- Ganchos de acuerdo con la inspección frecuente de la Norma ASME B30.10 [37]

Inspección periódica:

Inspección visual realizada por una persona designada, quien registra las condiciones externas que proporcionar la base de una evaluación continua. Una marca externa codificada en el polipasto es una identificación aceptable en lugar de los registros.

- Servicio normal – anual
- Servicio pesado – semestral
- Servicio severo – trimestral

Se deberían abrir o retirar las cubiertas y otros ítems generalmente proporcionados para permitir la inspección de componentes. Una persona designada debe determinar si las condiciones encontradas durante la inspección constituyen un peligro y si se requiere el desensamblado. Se deben inspeccionar los siguientes ítems:

- Verificar que los sujetadores no estén flojos.
- Verificar si existe alguna evidencia de desgaste, corrosión, grietas o deformaciones en los bloques de carga, ruedas de la cadena manual, acoplamientos de cadena, horquillas, yugos, pernos de suspensión, ejes, engranajes, rodamientos, clavijas, rodillos, dispositivos de bloqueo y fijación.
- Verificar si existe algún daño en las tuercas de retención del gancho o collarines, clavijas, soldaduras o remaches usados para asegurar los miembros de retención.
- Verificar si existe algún daño o desgaste en los piñones de carga, piñones libres, tambores y poleas.
- Verificar si el mecanismo de freno está desgastado, los discos de fricción contaminados con aceite, los gatillos desgastados, las levas o trinquetes corroídos, estirados, o los resortes del trinquete rotos en los polipastos manuales de cadena.
- Verificar si el freno del motor y el freno de carga de los polipastos eléctricos o de aire, están desgastados.
- Verificar si existe corrosión por picaduras o deterioro de los contactos del dispositivo de control en los aparatos eléctricos de los polipastos eléctricos.
- Verificar si existen daños en la estructura de soporte o el carro, si fueran usados.
- Verificar si existe alguna evidencia de desgaste, corrosión, grietas o deformaciones en las conexiones de los extremos de las cadenas de carga o cables de acero.
- Verificar la legibilidad de las etiquetas de funcionamiento en las estaciones de control colgantes, en polipastos eléctricos y de aire.

### 5.4.2. Ganchos de izaje

#### Correcta operación

El personal que utilice ganchos deberá tener en cuenta:

- Se deberá determinar que el peso de la carga a levantar no exceda la menor capacidad de carga nominal del gancho o del equipo del que el gancho forma parte.
- Se evitarán las cargas impactantes
- La carga se debe centrar en la base (Cuchara/silla) del gancho para evitar la carga concentrada del gancho.
- No se debe utilizar los ganchos poniendo cargas laterales o posteriores.
- Cuando se utiliza un dispositivo para cerrar la abertura de la garganta del gancho, se procurará que la carga no la lleve el dispositivo de cierre.
- Las manos, dedos y cuerpo no estarán entre el gancho y la carga.
- Los ganchos dúplex (gemelos) deberán ser cargados por igual a ambos lados a menos que el gancho esté específicamente diseñado para una sola carga.
- El uso de un gancho con seguro no imposibilita la separación involuntaria de una eslinga suelta o de una carga. En todos los casos es necesaria la inspección visual del aseguramiento correcto del gancho.
- Cuando un seguro viene equipado con pestillo, el pestillo no debe impedir el cierre al usarlo.

#### Inspección periódica [37]

Los ganchos que presenten cualquiera de las siguientes condiciones serán retirados de servicio hasta ser reemplazados:

- Deformación: Cualquier dobladura o torcedura visiblemente aparente desde el plano del gancho sin doblar. Ver figura 92.



Figura 92. Gancho de izaje deformado



Fuente: INCOMIMEX [38]

- Desgaste: Cualquier desgaste superior al 10% (o según lo recomendado por el fabricante) de la dimensión original de la sección del gancho o de su clavija de carga. Ver figura 93.

Figura 93. Gancho de izaje desgastado



Fuente: INCOMIMEX [38]

- Incapacidad de bloqueo: Todo gancho autoblocante que no se bloquea. Ver figura 94.

Figura 94. Gancho de izaje sin bloqueo



Fuente: INCOMIMEX [38]

- Despique: Cualquier muesca o fisura que presente el elemento. Ver figura 95.

Figura 95. Gancho de izaje con fisura



Fuente: INCOMIMEX [38]

## 5.5. SEGURIDAD AL UTILIZAR GRÚAS PESCANES

La principal acción para mantener la seguridad de los operarios al utilizar una grúa es realizar correctamente su mantenimiento. Leer el manual de instrucciones del equipo también es una buena opción para ello.

Además, se recomiendan algunas prácticas para evitar accidentes, así como otras que han de preservar la vida útil del equipo:

Buenas prácticas [39]:

- Maniobrar la grúa desde los lugares y controles establecidos para ello por el fabricante
- Informar a todas las personas presentes de que se va a mover la carga
- Las cargas deben ser enganchadas por un operario preparado para esta labor y solo cuando la grúa se haya detenido completamente
- Establecer distancias de seguridad con los objetos con los que pueda chocar la grúa durante su operación
- Balancear las cargas al momento de engancharlas e izarlas, asegurarse de que todo está totalmente asentado.
- Retirar todos los elementos cuando la grúa no se esté usando, así evitar que estos se desprendan de manera inesperada, especialmente cuando se trata de elementos de alimentación electromagnética
- Realizar una inspección visual y un bloqueo cuando se deba abandonar el equipo por algún motivo

Evitar [39]:

- Introducir las manos en algún elemento móvil mientras la grúa se encuentra en uso
- Realizar movimientos repentinos o demasiado rápidos respecto a la velocidad de diseño del equipo
- Transportar cargas por vías peatonales
- Balancear las cargas para depositarlas en un lugar lejano
- Realizar movimientos de rotación no adecuados
- Transportar personal
- Dejar objetos colgados en el gancho de la grúa sin supervisión de algún operario
- Sobrepasar la carga nominal del gancho de la grúa
- Transportar cargas de manera horizontal o en diagonal

Dentro del proceso de puesta en marcha de la grúa se elaboró un documento interno clasificado como MOTS [40], donde se describe el proceso seguro para cambio de las almohadillas en las cajas de laminación. Este documento se encuentra en el archivo documental de Ternium Siderúrgica de Caldas.

Estas pautas no son las únicas que se deben poner en práctica, todas las que dicte el sentido común de quienes interactúan diariamente con el equipo pueden ser indispensables para mantener la seguridad de todo el personal, de la grúa y del proceso industrial para el cual fue diseñada.

## **6. CONCLUSIONES, APORTES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES**

Durante el proceso de diseño de la grúa pescante para Ternium Siderúrgica de Caldas, se describió y caracterizó de manera oportuna y correcta la necesidad planteada ya que, como empresa productora de acero, posee protocolos de diseño de maquinaria estrictos que fueron la guía para este desarrollo, con el fin de garantizar la seguridad del proceso y de quienes laboran dentro de la planta.

Dentro de las posibles alternativas para satisfacer la necesidad planteada, se evaluó la funcionalidad, el tamaño, costo y otros factores de cada uno de los tipos de grúas, que estuvieran acorde con las políticas ya mencionadas y además con el presupuesto destinado al proyecto. Se definió la alternativa que se espera satisfaga la necesidad de manera correcta.

Fue desarrollado el diseño a detalle de la grúa, con funcionalidad y vida útil de acuerdo con los requerimientos de la empresa, al igual que los factores de seguridad obtenidos dentro del proceso de cálculo. Los resultados obtenidos de este trabajo dan cumplimiento a las políticas definidas por Ternium Siderúrgica de Caldas y fue aceptado para ponerse en funcionamiento dentro de sus instalaciones.

El proceso de diseño de la grúa pescante requería su validación por medio de herramientas computacionales, la cual fue realizada en el software ANSYS Workbench por medio de su módulo Static Structural, donde se simuló el entorno de trabajo para la grúa. Los resultados obtenidos del software son acordes a lo esperado y aseguran el funcionamiento de la estructura. Cuando un diseño es validado mediante un software de elementos finitos adquiere un grado de confiabilidad mayor debido a que estos programas están diseñados para disminuir los riesgos de falla de las máquinas, por lo tanto, se convierte en una herramienta importante para quien diseña.

La documentación necesaria, como memorias de cálculo y planos de fabricación, se elaboró y fue entregada para su almacenamiento dentro de la empresa. Es de esperarse que de allí se pueda obtener la información técnica necesaria para el proceso de fabricación y montaje de la grúa.

## **6.2. APORTES**

Los aportes desarrollados durante el presente trabajo son:

- Se elaboraron memorias de cálculo para la fabricación de una grúa tipo pescante (columna giratoria) con capacidad de levantar una carga de 300 kgf (2942 N), con una altura de 3 metros y un brazo de 2,65 m, en condiciones de seguridad óptimas para laborar en un servicio ligero durante aproximadamente 10 años.
- Fue realizado el proceso de vigilancia estratégica del producto con el fin de determinar la mejor opción para la solución del problema de Ternium Siderúrgica de Caldas, además del análisis funcional de una grúa cualquiera dentro del tren de laminación.
- Se desarrolló la información técnica y los protocolos de inspección e intervención como lineamiento de mantenimiento al que esta debe ser sometida la grúa durante su vida útil.
- Se obtuvieron simulaciones por medio de herramientas computacionales que permiten la verificación de la resistencia de la estructura. Dicha simulación puede ser modificada de acuerdo con el entorno en el que trabajará la grúa.
- Como anexo a este trabajo, se realizó una cotización base de proyecto, lo que representa una estimación del costo de fabricación.

## **6.3. RECOMENDACIONES**

- El análisis realizado en este trabajo tuvo consideraciones de carga, espacio, maniobra y entornos ideales, por lo tanto, es importante realizar un análisis del efecto real que estos factores puedan tener dentro de la funcionalidad de la grúa.
- Por eventos de seguridad pasados, Ternium considera como procedimiento crítico la operación de grúas, por eso es recomendable realizar una evaluación de riesgos para la correcta operación de la grúa que, si bien es pequeña, puede causar daños importantes.
- Desde el área encargada del seguimiento y mantenimiento de las máquinas que operan dentro de la empresa, es recomendable la realización de ensayos destructivos y no destructivos para una mejor caracterización de las propiedades de los materiales en la interacción con su entorno ya la que contaminación por laminilla en el tren laminador podría afectar su rendimiento.
- Se propone realizar un análisis transiente de cargas pico observando el cambio de la fuerza en el tiempo, debido a que las magnitudes pueden verse afectadas por vibraciones en la caja laminadora y en general por la labor propia que realiza la grúa.

- Como proyecto futuro, se puede evaluar la posibilidad de instalar una grúa similar a la diseñada en este proyecto entre las cajas laminadora 3 y 3A, contando con un espacio más reducido y condiciones de carga diferentes a las evaluadas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] OCAMPO, Ángela María. Plano 03219-00. Acople lado laminador caja 4 y 6 – ensamble. Manizales, Colombia: Ternium Siderúrgica de Caldas, 2015.
- [2] OCAMPO, Ángela María. Plano TLAM-ALARC4Y6-T1-00. Alargaderas RTJ caja 4 y 6. Manizales, Colombia: Ternium Siderúrgica de Caldas, 2013.
- [3] MECÁNICA PLÁSTICA. Poliamida 6. [s.l.]: el autor. 3 p.
- [4] OCAMPO, Diego. Plano 02924-01. Almohadilla acople lado laminador. Manizales, Colombia: Ternium Siderúrgica de Caldas 2016.
- [5] Plano BC-GEN-INFR-GENE-GBA-00001-0A. Layout tren de laminación 1 [Anónimo]. Manizales, Colombia: Ternium Siderúrgica de Caldas. 2010.
- [6] MUÑOZ YANDA, David. Diseño de un procedimiento para el cálculo y selección de la viga principal de un puente grúa. Grado en ingeniería mecánica. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente, 2013. 90 p.
- [7] ABUS. Puente grúa monorriel. [en línea], 17 de noviembre de 2018. Disponible en Internet: <https://www.abus-kraansystemen.nl/kranen/hb-systemen/enkelliger-hangbaan-ehb-x>.
- [8] UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Puente grúa birriel. [en línea], 17 de noviembre de 2018. Disponible en Internet: [http://dim.usal.es/areaim/guia P. I/IMAGENES/gruas/puente\\_grua\\_birrail.jpg](http://dim.usal.es/areaim/guia_P_I/IMAGENES/gruas/puente_grua_birrail.jpg).
- [9] BLANES ECKERT, Víctor. Estudio de mecanismo de elevación para el izado de embarcaciones en un puerto de pequeño porte. Grado en Ingeniería técnica naval en propulsión y servicios del buque. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2014. 124 p.
- [10] HANSECOL. Grúa pluma giratoria. [en línea], 17 de noviembre de 2018. Disponible en Internet: <http://www.hansecol.com.co/gruas-plumas-giratorias/>.
- [11] WEIHUA GRÚA. Grúa giratoria de columna fija. [en línea], 30 de octubre de 2018. Disponible en Internet: <https://weihuagruapluma.cl/gruas-giratorias-de-columna-fija/>.
- [12] BARATO GONZÁLEZ, Adriana. Grúa portuaria para elevación de embarcaciones. Grado en Ingeniería Mecánica. Bilbao, España: Universidad del País Vasco, 2015.
- [13] DGCRANE. Grúas pórtico. [en línea], 8 de noviembre de 2018. Disponible en Internet: <https://es.dgcrane.com/productos/gruas-portico-monovigas/>.
- [14] DGCRANE. Grúa semipórtico. [en línea], 8 de noviembre de 2018. Disponible en Internet: <https://es.dgcrane.com/productos/gruas-semiportico/>.
- [15] MORALES DÍAZ, Leonel Vinicio. Análisis por matriz de decisión para seleccionar una nueva línea de negocio en una empresa establecida. [s.l.]: Ingeniería Simple, 2008. 3 p.
- [16] LUCEÑO MARTÍNEZ, Elisabeth. Grúa giratoria de columna fija de 5 Tm. Grado en Ingeniería Industrial. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2006. 83 p.
- [17] RÍOS, Wilson y DÍAZ, Diego. FYASEG004. Elementos de izaje. Manizales, Colombia: Ternium Siderúrgica de Caldas, 2012.

- [18] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO (España). Real Decreto 1435/1992 de 27 de noviembre. Madrid, España: Ministerio de trabajo y asuntos sociales, 1992. 383 p.
- [19] VANEGAS USECHE, Libardo Vicente. Diseño de elementos de máquinas. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.
- [20] TECNITUBERÍAS. Tubería en acero. Bogotá DC, Colombia: [s.n.], 2001. 2 p.
- [21] CONSORCIO METALÚRGICO NACIONAL LTDA - COLMENA. Perfiles siderúrgicos I-H-W. Bogotá DC, Colombia: [s.n.]. 4 p.
- [22] INGEMECÁNICA. Distribución de esfuerzos sobre el bastidor del vehículo. [en línea], 21 de octubre de 2018. Disponible en Internet: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn14.html>.
- [23] CERVERA RUÍZ, Miguel y BLANCO DÍAZ, Elena. Resistencia de Materiales. Barcelona, España: CIMNE, 2015. 317 p.
- [24] CARGAS DINÁMICAS y fatiga [Anónimo]. En: Contenido estabilidad II. Capítulo 11. Medellín, Colombia: Universidad Nacional del Surdeste, 2010. 14 p.
- [25] BELÉNDEZ, Tarsicio; NEIPP, Cristian y BELÉNDEZ, Augusto. Large and small deflections of a cantilever beam. En: European Journal of Physics. Alicante, España. Diciembre, 2002. Vol. 3, no 2. p. 371–379.
- [26] BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley. 8 ed. México DF, México: [s.n.], 2008.
- [27] MOTT, Robert L. Resistencia de materiales. 5 ed. México DF, México: PEARSON Educación, 2009.
- [28] DOMINGO SANTILLADA. Jaime Santo. Pandeo. En: Contenido Resistencia de Materiales ingeniero técnico en obras públicas. Capítulo 10. Salamanca, España: Universidad de Salamanca, 2008. 22 p.
- [29] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Real decreto 842/2002, de 2 de agosto. Madrid, España: AENOR, 2002. 432 p.
- [30] ABUS. Sistemas de grúas. Grúas pluma. [s.l.]: el autor. 26 p.
- [31] DEMAG. Pescantes giratorios de columna y murales. Wetter, Alemania: el autor. 22 p.
- [32] ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Lever Hoists (Formerly Manually Lever Operated Hoists). ASME B30.21. New York, USA: la asociación, 2013. 63 p.
- [33] ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Overhead Underhung and Stationary Hoists formerly Overhead Hoists (Underhung). ASME B30.16. New York, USA: la asociación, 2017. 53 p.
- [34] NATIONAL STANDARD OF CANADA. Safety Standard for Maintenance and Inspection of Overhead Cranes, Gantry Cranes, Monorails, Hoists, and Trolleys. CAN/CSA-B167-96. Ottawa, Canadá: el consejo, 2002. 13 p.
- [35] FERNÁNDEZ RUIZ, Juan. Implantación RCM en grúas pórtico. Grado en Ingeniería Técnica Industrial. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena, 2015.
- [36] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO (España). Grúas tipo puente III. Montaje, instalación y mantenimiento. NTP



738. Madrid, España: Ministerio de trabajo y asuntos sociales, 2004, 9 p.
- [37] ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Hooks. ASME B30.10. New York, USA: la asociación, 2014. 17 p.
- [38] INCOMIMEX Criterios para la revisión de eslingas de cadena. [en línea], 7 de octubre de 2018. Disponible en Internet: <https://incomimex.wordpress.com/2014/11/18/criterios-para-la-revision-de-eslingas-de-cadena/>.
- [39] CONSTRUEQUIPOS. Normas de seguridad para torre grúas. [s.l.]: [s.n.].
- [40] VARGAS PRADA, Beatriz Helena. MOTLAM02003. Cambio de pasos y/o línea en el tren continuo - Tren 1. Manizales, Colombia: Ternium Siderúrgica de Caldas, 2015. 9 p.

# ANEXO A

## Clasificación según FEM

Las grúas se clasifican según la FEM (Federación Europea de la Manutención) [1] en seis tipos, lo que determina la aplicación para la cual está diseñada. Existen dos métodos equivalentes por los cuales definir el tipo de grúa y estos dependen de factores similares, como se muestra en la tabla A1:

Tabla A1. Métodos para clasificación de grúas

	MÉTODO 1	MÉTODO 2
FACTORES	Vida útil	Espectro de carga
	Estado de carga	Tiempo medio de funcionamiento diario

Fuente: Autores

### MÉTODO 1 [2]

- Vida útil: Representa el número de horas real que se estima durará la grúa a lo largo de su servicio. Ver tabla A2.

Tabla A2. Clasificación de grúas por vida útil

Grupo	A	B	C	D	E	F	G
Vida en horas	800	1600	3200	6300	12500	25000	50000

Fuente: Larrodé [2]

- Estado de carga: Representa en qué medida la grúa levanta la carga máxima o un porcentaje de ella. Ver tabla A3.

Tabla A3. Clasificación de grúas por estado de carga

ESTADO DE CARGA	SERVICIO
1	Frecuencia muy reducida de la carga máxima
2	Frecuencia reducida de la carga máxima
3	Frecuencia aproximada igual de cargas pequeñas, medianas y máximas
4	Frecuencia elevada de la carga máxima

Fuente: Larrodé [2]

A partir de los dos factores calculados anteriormente, en la tabla A4 se muestra la clasificación correspondiente:

Tabla A4. Clasificación final de grúas

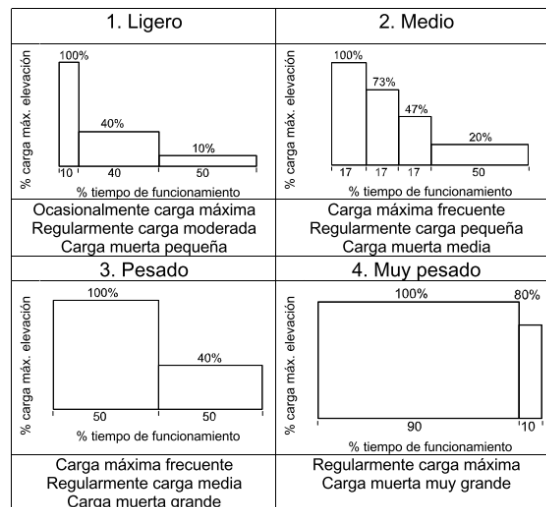
		VIDA DEL MECANISMO						
		A	B	C	D	E	F	G
ESTADO DE CARGA	1			M3	M4	M5	M6	M7
	2		M3	M4	M5	M6	M7	M8
	3	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M8
	4	M4	M5	M6	M7	M8	M8	M8

Fuente: Larrodé [2]

## MÉTODO 2 [1]

- Espectro de carga: Se evalúa con base a cuatro tipos de condiciones de servicio. Ver figura A1.

Figura A1. Esquema de clasificación de grúas por espectro de carga



Fuente: VINCA [1]

- Tiempo medio de funcionamiento diario:

$$t = \frac{2 \cdot H \cdot N \cdot T}{V \cdot 60} \quad (A1)$$

donde:

$H$  = Altura media de elevación en metros

$N$  = Número de ciclos por hora (un ciclo consiste en un movimiento de elevación y otro de descenso)

$T$  = Tiempo de trabajo en horas

$V$  = Velocidad de elevación en metros por minuto

A partir de los dos factores calculados anteriormente, en la tabla A5 se muestra la clasificación correspondiente:

Tabla A5. Clasificación según espectro de carga y tiempo medio de funcionamiento

ESPECTRO DE CARGA	TIEMPO MEDIO DE FUNCIONAMIENTO (HORAS POR DÍA)					
	0,5	1	2	4	8	16
Ligero			M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m
Medio		M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m
Pesado	M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m	
Muy pesado	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m		

Fuente: VINCA [1]

Nota: Los valores mostrados en la parte inferior de cada casilla (1Bm, 1Am, etc...) se refieren a la nomenclatura FEM anterior, equivalente a la mostrada en la parte superior.

Los grupos de trabajo están definidos así [3]:

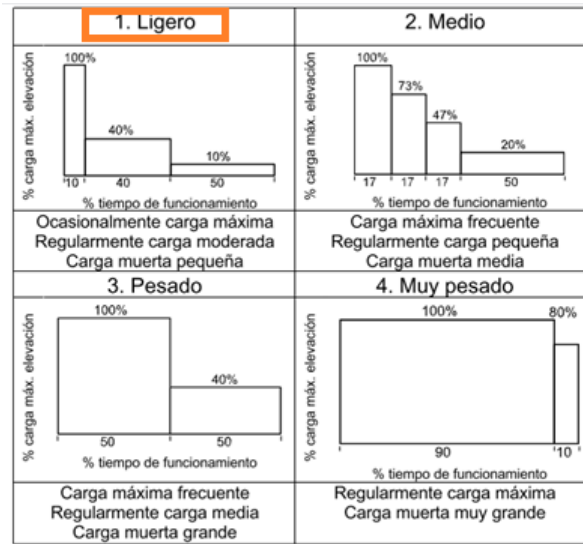
- M3: Aparatos de mantenimiento y aparatos de taller en servicio ligero
- M4, M5 y M6: Aparatos de taller en servicio intermitente, aparatos de taller en servicio intenso y aparatos de almacén con sistema de aprensión en el gancho, servicio regular.
- M7 y M8: Aparatos de acérías y parque de chatarra.

Para este trabajo se realizarán los cálculos con el método 2 debido a la posibilidad de conocer o suponer la información necesaria:

Espectro de carga:

Ligero (Ocasionalmente carga máxima, regularmente carga moderada, carga muerta pequeña). Ver figura A2.

Figura A2. Selección del espectro de carga - Método 2



Fuente: VINCA [1]

Tiempo medio de funcionamiento diario:

$$t = \frac{2 \cdot 3 \text{ m} \cdot 1 \frac{\text{ciclos}}{\text{hr}} \cdot 5 \text{ hr}}{8 \text{ m/min} \cdot 60} = 0,0625 \text{ hr}$$

$$H = 3 \text{ m}$$

$$N = 1 \frac{\text{ciclo}}{\text{hr}}$$

$$T = 5 \text{ hr}$$

$$V = 8 \text{ m/min}$$

Con los cálculos anteriores, se tiene la figura A3:

Figura A3. Selección del tipo de grúa - Método 2

Espectro de carga	Tiempo medio de funcionamiento UNE/ISO/FEM (horas por día)					
	0.5	1	2	4	8	16
Ligero	X		M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m
Medio		M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m
Pesado	M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m	
Muy pesado	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m		

Fuente: Autores

Al no tener clasificación para la aplicación que se está estudiando, el tipo de grúa sería el mínimo (M3).

Es importante aclarar que, aunque la empresa se dedica a la producción de acero, la grúa diseñada no será utilizada para el proceso como tal si no para una actividad complementaria de mantenimiento.

Las grúas con clasificación M3 no suelen tener un ciclo de trabajo definido y son utilizadas normalmente en aplicaciones que sea necesario manejar cargas de un valor importante con mucha precisión y a muy bajas velocidades, con tiempos muertos muy largos entre cada levantamiento (no más de dos levantes al mes a plena capacidad).

Finalmente, las inspecciones oficiales y completas para cada grupo de grúas según la FEM se establecen en la tabla A6, complementando con lo que se menciona en el capítulo 5.

Tabla A6. Periodo de inspección de la grúa

Grupo ISO Según UNE 58 112-1	Grupo según DIN y antigua FEM	Inspección oficial (OCA)
M3	1Bm	10 años
M4	1Am	5 años
M5	2m	5 años
M6	3m	5 años
M7	4m	2 años
M8	5m	2 años

Fuente: FEM [3]

## BIBLIOGRAFÍA





- [1] VINCA EQUIPOS INDUSTRIALES. Polipastos. Clasificación según condiciones de servicio. [s.l.]: la sociedad, 2001. 3 p.
- [2] LARRODÉ, Emilio y MIRAVETE, Antonio. Grúas. Universidad de Zaragoza: Servicio de Publicaciones - Centro Politécnico Superior, 1996. 561 p.
- [3] FEM - ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE MANUTENCIÓN. Guía de verificación de grúas. Madrid, España: la asociación, 2016. 20 p.



# ANEXO B

Para la instalación de la grúa se requieren diferentes elementos que serán comprados en empresas cercanas a la compañía y para esto se solicitaron las siguientes cotizaciones de elementos, mostradas en las figuras B1, B2, B3, B4, B5 y B6:

Figura B1. Cotización Winche eléctrico marca KTX

		Puente Grúa - Polipastos - Talamandas - Transmisión de Potencia - Automatización			
Carrera 47D # 78C Sur - 43 Sabaneta (Antioquia). Pbx/Fax: (4) 444 84 52. www.giravan.com					
COTIZACION REF:		CTG 11815		Fecha:	
EMPRESA:		TERNIUM		30 de agosto de 2016	
DIRIGIDO A:		ING. DIEGO OCAMPO GIL		Área:	
Telefono:		Celular: 3117472758		MANTENIMIENTO	
Responsable:		victor arboleda		Ciudad:	
Celular:		318 358 65 20		MANIZALES	
		Mail:		docampo@ternium.com.co	
		Mail:		ventas2@giravan.com	
		www.bonfiglioli.com		www.lsis.biz	
De acuerdo a lo solicitado en la requisición ,nos permitimos ofrecer					
ITEM	CANT.	DESCRIPCION	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL	
1	1	WINCHE ELECTRICO 500 A 1,000 KG SIN TROLLEY	\$ 1,800,000	\$ 1,800,000	
		MARCA	KTX		
		FABRICACION	KOREANA		
		TIPO	WINCHE ELECTRICO A CABLE		
		REFERENCIA	WS-S100		
		VOLTAJE OPERACIÓN	220 VAC.		
		CAPACIDAD	HASTA 1 TONELADA.		
		MOTOR ELEVACION	0,75 KW		
		VELOCIDAD ELEVACION	6,5 m/min		
		TIPO DE TRABAJO	Según ISO=M4		
		TIPO DE TRABAJO	LIVIANO		
		LONGITUD DE CABLE	12 m		
		SENSORES	SUBIR		
		DETECTOR DE FASE	N/A		
		BOTONERA	4 m IP 65		
		TIPO DE MONTAJE	VERTICAL.		
			TOTAL	\$ 1,800,000	
IVA:	16% Sin incluir			Cordialmente,	
Entrega:	2-3 DIAS			VICTOR ARBOLEDA	
Forma de Pago:	CREDITO.			ventas2@giravan.com	
Garantía:	1 Año				
NOTA	NO INCLUYE INSTALACION			Cra 47D N° 78C Sur - 43, Sabaneta	

Fuente: Autores

Figura B2. Cotización de rodamientos

[illegible]

Fuente: Autores

Figura B3. Cotización de polipasto

ProWinch		LSQA		Cotización N° 102,370	
Calle 163 A # 20 - 28, Bogotá - Colombia Tel: 7834039 / 35 / 320 820056		CERTIFICADO RUT 900.806.894-2 www.prowinch.co		26 de Agosto de 2016 PROWINCH COLOMBIA S.A.S.	
<b>Cliente</b>	TREN DE LAMINACIÓN   TERNIUM		<b>NIT</b>		
<b>Nombre</b>	Diego Ocampo Gil		<b>Validez Oferta</b>	10/sep/2016	
<b>Dirección</b>			<b>Correo electrónico</b>	docampo@ternium.com.co	
<b>Código Postal</b>			<b>Barrio</b>		
<b>Ciudad</b>	Bogotá - Colombia		<b>Teléfono</b>	311747275	
<b>País</b>			<b>Web</b>		
<b>Entrega</b>					

Código	Cant	Descripción	Precio Unitario	Sub Total
PWQM1T	1	Carro Manual 1 Tonelada, (Codigo:PWQM1T) <b>DESPACHO INMEDIATO</b>	\$321.294	\$321.294
PWX990u	1	Polipasto cable con Carro Electrico 500Kg Simple 1000Kg con limitador superior 110~120V 60HZ. (Codigo:PWX990u) <b>DESPACHO INMEDIATO</b>	\$2.173.529	\$2.173.529
PWA990u	1	Polipasto cable 500Kg Simple 1000Kg con limitador superior 110~120V 60HZ. (Codigo:PWA990u) <b>DESPACHO INMEDIATO</b>	\$1.417.529	\$1.417.529
PWBZ1TA3P3	1	Brazo pescante 3lb Crane 1 Ton Incluye PWRC1 de 3 Mts altura izaje. (Codigo:PWBZ1TA3P) <b>ENTREGA 90 DIAS HABILES</b>	\$37.574.000	\$37.574.000
PWBZ1TA3P3	1	Brazo pescante 3lb Crane 1 Ton Incluye PWRC1 de 3 Mts altura izaje. Fabricación nacional. (Codigo:PWBZ1TA3P3) <b>ENTREGA 35 DIAS HABILES</b>	\$27.859.850	\$27.859.850

**GARANTIA DE 3 AÑOS**

EQUIPOS DISEÑADOS PARA MANEJO DE CARGA, PROWINCH QUEDA EXIMIDO DE RESPONSABILIDAD SI SON USADOS PARA IZAJE DE PERSONAL  
ABSTENERSE DE EFECTUAR RETENCIÓN EN LA FUENTE. SOMOS BENEFICIARIOS DE LA LEY 1439 ART. 4 DE 2010

Reserva con orden de compra y despacho con pago anticipo del 100%.  
Los valores son en PESOS COLOMBIANOS. El envío será al cobro o la entrega se efectuará en nuestra bodega.  
CUMPLIDA LA FECHA DE VIGENCIA SE DEBERÁ ACTUALIZAR LA COTIZACIÓN

<b>Datos Transferencia:</b>	<b>Sub Total</b>	\$69.346.202
Banco: Banco del Occidente Cuenta de Ahorro No. 219,83687,1	<b>I.V.A. 16%</b>	\$11.095.392
Nombre Beneficiario:	<b>Total</b>	\$80.441.594

Fuente: Autores

Figura B4. Cotización rodamientos de agujas

NIT: 86065746-5 DIR: CL 15 # 25 - 267 BOD C10, TERMINAL LOGISTICO PACIFICO Sucursal: CALI Tel: 4550003 Fax: 4550003 call@diarod.com www.diarod.com YUMBO (VALLE DEL CAUCA) - Colombia		Atendido por: EJE CAFE - JEVILLEGAS Cargo: Email: Vendedor: v409	Pagina 1 de 1 <b>Cotizacion</b> <b>No. CT40071383</b> Fecha: 23/11/2016 02:54:17 p.m.
Razon Social: TERNIUM SIDERURGICA DE CALDAS S.A.S. C900174468 Direccion: KM 2 VIA TERMALES LA ENEA		NIT: 900174468 Telefono: 8997600 4447799 Ciudad: MANIZALES (CALDAS)	Requisicion: Validez: 5 Dias

Item	No.	Parte	Referencia	Descripcion	Disponibilidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	10004105	22210EAE4-NSK		rodamiento de rodillos esfericos con jaula en acero ranura/agujeros de lubricacion en marca NSK	2 dias	2	86.610,00	173.220,00
2	06001178	AZK35627.5 (K81207)-IKO		rodamiento de agujas en marca IKO	2 dias	1	50.550,00	50.550,00
3	06001179	GS3562 (GS81207)-IKO		pista exterior marca IKO	2 dias	1	22.130,00	22.130,00
4	06001180	WS3562 (WS81207)-IKO		pista interior en marca IKO	2 dias	1	22.130,00	22.130,00

Entrega:	Somos Autoreteneadores y Grandes Contribuyentes	Disponibilidad sujeta a previa venta.
Observaciones:	credito	

<b>Neto:</b>	268.030,00
<b>IVA 16 %:</b>	42.884,80
<b>Total a Pagar:</b>	310.914,80

Fuente: Autores

Buena tarde Sr Luis.

Con gusto le cotizo.

El rodamiento de rodillos 22210 está en convenio a UDS 48 , 05 marca NTN (código -10306500 )

El rodamiento axial 81207 marca INA \$ 171.158

+ IVA

Entrega : 1 día.

Saludos.

Feliz tarde.

**Oscar Sánchez Acosta**  
Asistente de Industria  
Tel 6 05 36 36 ext 124  
Cel. 300 8 75 75 40  
Email, [oscarsanchez@arsa.com.co](mailto:oscarsanchez@arsa.com.co)

Figura B6. Cotización polipasto eléctrico

Fuente. Autores

141

Tabla B1. Elementos cotizados

ELEMENTO	VALOR
POLIPASTO	
Winche 500-1000 kg	\$1.800.000
Polipasto 500-1000 kg	<b>\$1.417.529</b>
Polipasto con carro 500 kg	\$2.173.529
RODAMIENTOS	
Rodamiento esférico SKF	\$180.000
Rodamiento rodillos esférico	<b>\$86.610</b>
Rodamiento axial	\$230.000
Rodamiento axial	\$171.158
Rodamiento agujas	\$50.550
Rodamiento de rodillos	USD 48
DIFERENCIAL	
Diferencial 550 W	<b>\$687.375</b>
Diferencial 0,8 KW	\$4.185.000
BRAZO	
Brazo pescante	\$37.574.000
Brazo pescante nacional	<b>\$27.859.850</b>
CARRO PARA POLIPASTO	
Carro manual 1 Ton	<b>\$321.924</b>
PISTA	
Pista	\$22.130

Fuente: Autores

Los elementos marcados en negrilla fueron los que finalmente se seleccionaron, con asesoría de ingenieros civiles de Ternium Siderúrgica de Caldas, para la puesta en funcionamiento de la grúa. Dichos elementos tienen las siguientes características:

#### POLIPASTO

- Eléctrico
- Capacidad: 500-1000 kg
- Limitador superior: Sí
- Carro: No
- Voltaje: 110 - 120 V
- Frecuencia: 60 Hz

#### CARRO

- Capacidad: 1 Ton

#### RODAMIENTOS

- Tipo: Rodillos esféricos
- Marca: NSK
- Jaula en acero
- Agujeros de lubricación

#### BRAZO PESCANTE

- Capacidad: 1 Ton
- PWRC1
- Distancia izaje: 3 m

#### DIFERENCIAL

- Potencia: 550 W
- 150/300 k
- Bauker

Así pues, sin incluir los costos de montaje ya que estos son asumidos por parte de intendencia, el presupuesto general del diseño sería como sigue en la tabla B2:

Tabla B2. Presupuesto general del diseño

ELEMENTO	CANT.	COSTO
Polipasto 500-1000 kg	1	\$1.417.529
Rodamiento esférico	1	\$86.610
Diferencial 550 W	1	\$687.375
Brazo pescante nacional (Viga IPE 180 ASTM A572 GR 50)	1	\$27.859.850
Carro manual 1 Ton	1	\$321.924
Tubería 8" SCH 80	6 m	\$150.000
Mano de obra soldador	30 hr	\$525.000
	<b>TOTAL</b>	<b>\$31.048.288</b>

Fuente: Autores

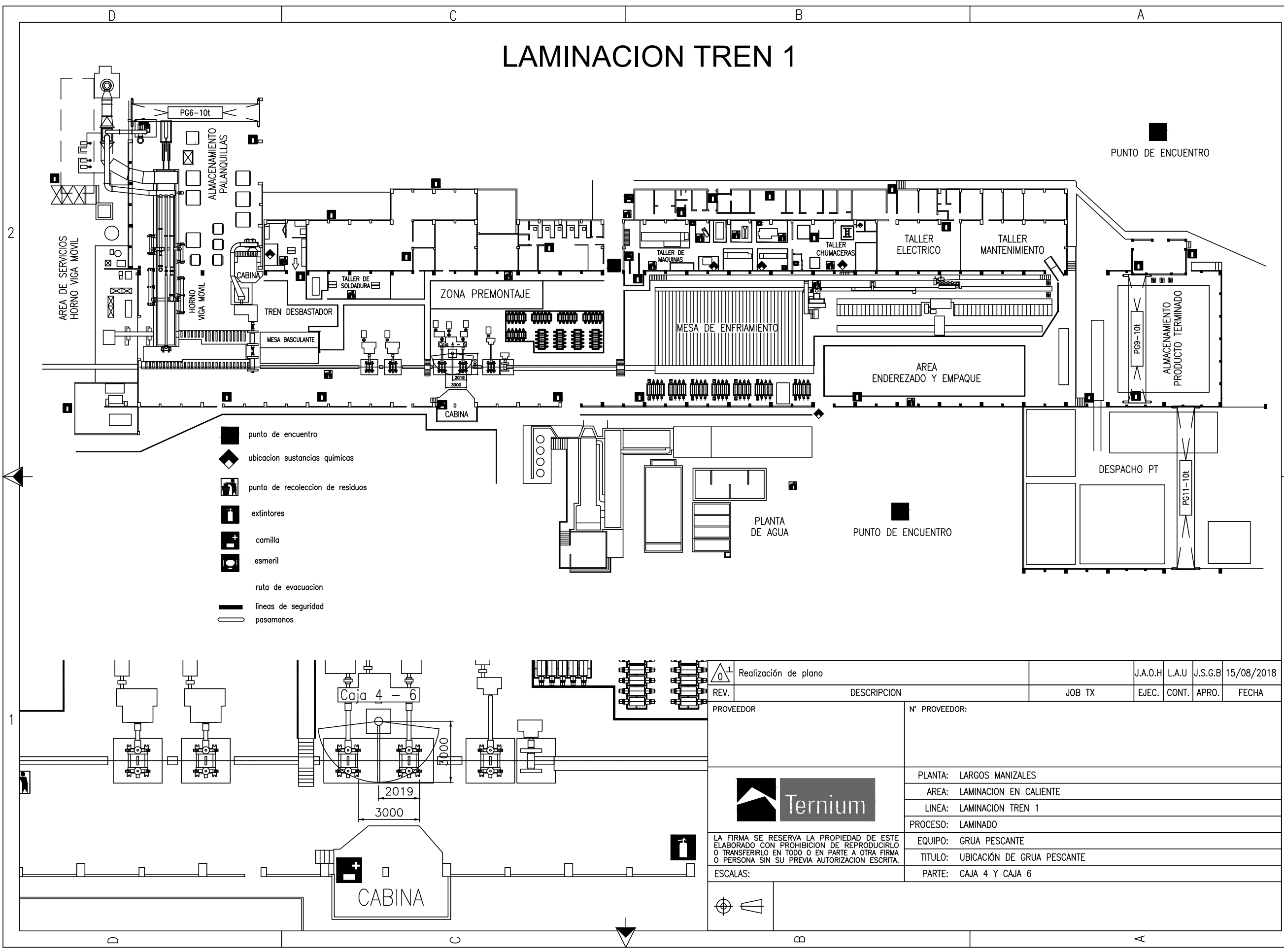
La información consignada en este anexo es solamente informativa ya que la decisión de compra de materiales y contratación para la fabricación es competencia del área de ingeniería de Ternium Siderúrgica de Caldas y son ellos quienes tienen la última palabra al respecto.

# ANEXO C

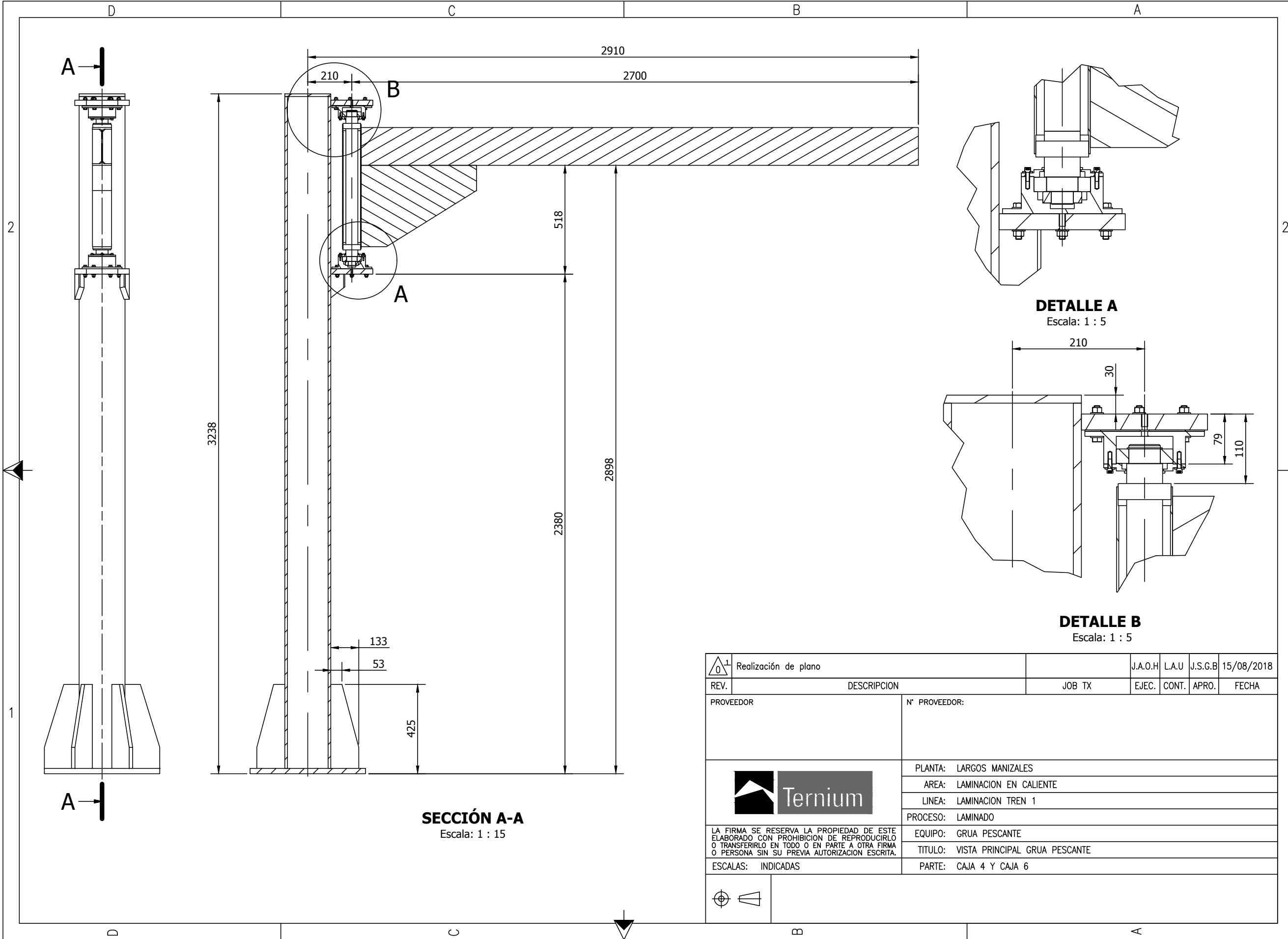




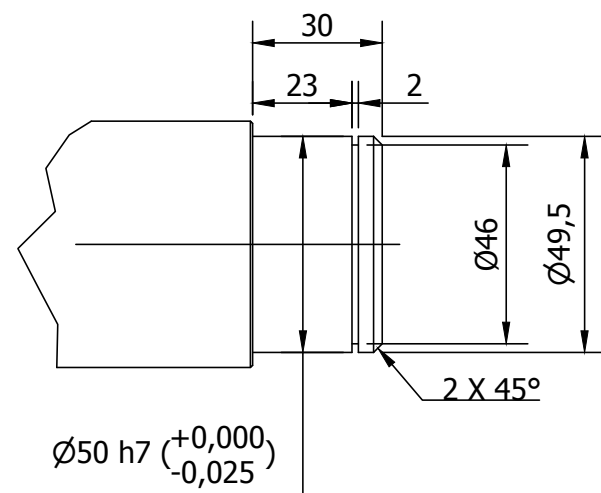
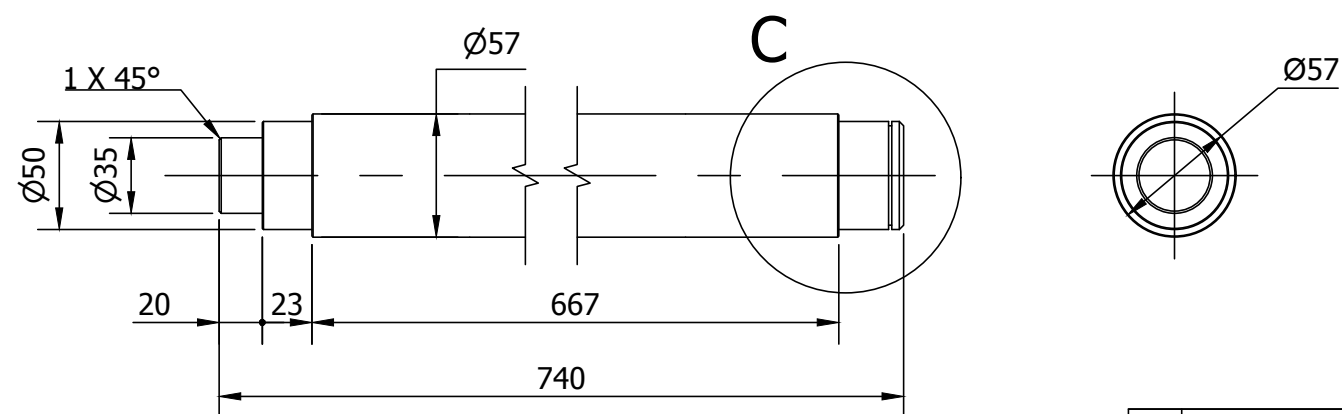
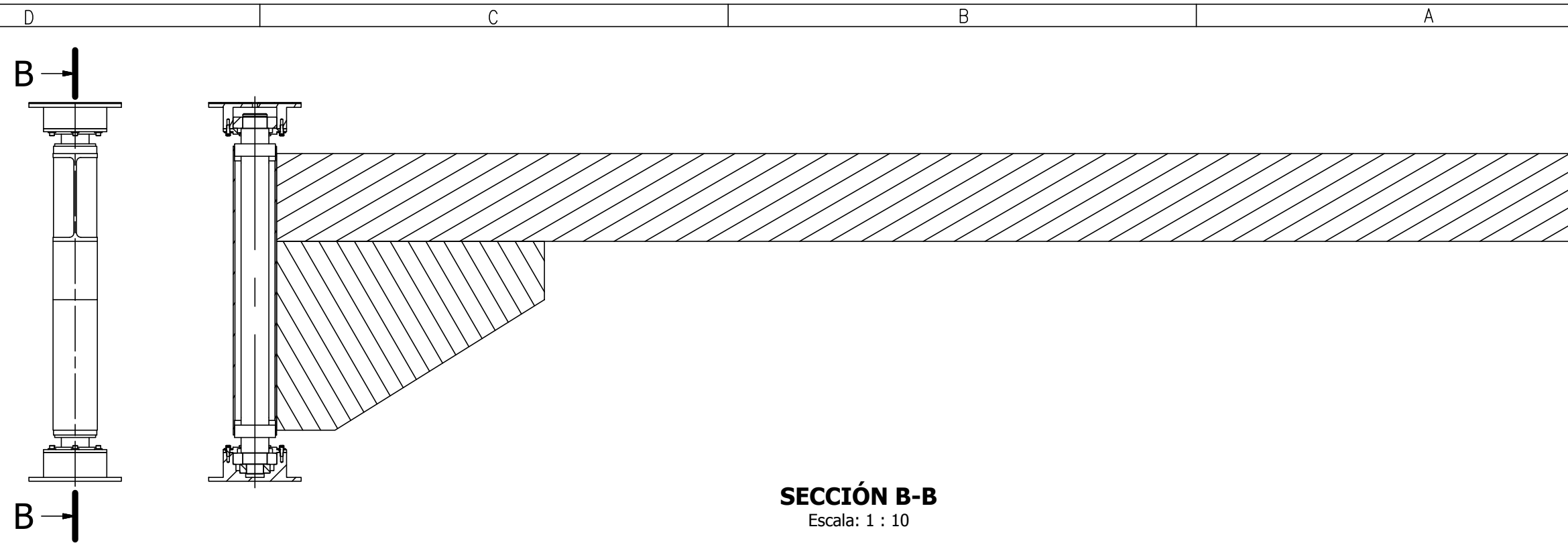
LAMINACION TREN 1



<div><div><div></div><div>0</div><div>1</div></div></div>	Realización de plano				J.A.O.H	L.A.U	J.S.G.B	15/08/2018
REV.	DESCRIPCION		JOB TX		EJEC.	CONT.	APRO.	FECHA
PROVEEDOR			N° PROVEEDOR:					
<div><div><div></div><div>Ternium</div></div></div> <div>LA FIRMA SE RESERVA LA PROPIEDAD DE ESTE ELABORADO CON PROHIBICION DE REPRODUCIRLO O TRANSFERIRLO EN TODO O EN PARTE A OTRA FIRMA O PERSONA SIN SU PREVIA AUTORIZACION ESCRITA.</div>			PLANTA: LARGOS MANIZALES					
			AREA: LAMINACION EN CALIENTE					
			LINEA: LAMINACION TREN 1					
			PROCESO: LAMINADO					
			EQUIPO: GRUA PESCANTE					
ESCALAS:			TITULO: UBICACIÓN DE GRUA PESCANTE					
			PARTE: CAJA 4 Y CAJA 6					
<div><div><div></div><div></div></div></div>								

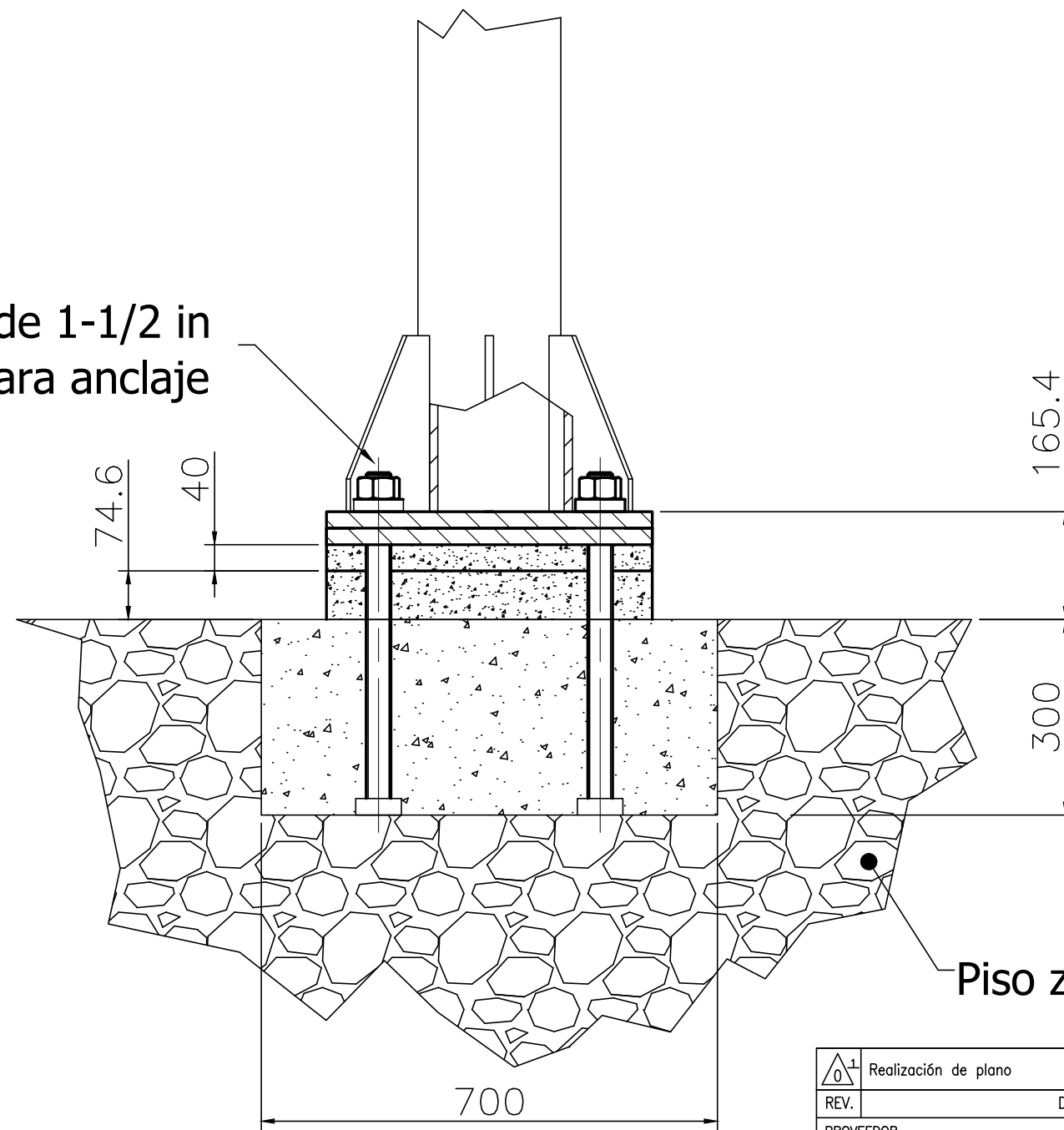


<div><div><div>0</div><div>1</div></div></div> Realización de plano			J.A.O.H	L.A.U	J.S.G.B	15/08/2018
REV.	DESCRIPCION	JOB TX	EJEC.	CONT.	APRO.	FECHA
PROVEEDOR		N° PROVEEDOR:				
<div><div><div></div></div><div>Ternium</div></div>		PLANTA: LARGOS MANIZALES				
		AREA: LAMINACION EN CALIENTE				
		LINEA: LAMINACION TREN 1				
		PROCESO: LAMINADO				
		EQUIPO: GRUA PESCANTE				
LA FIRMA SE RESERVA LA PROPIEDAD DE ESTE ELABORADO CON PROHIBICION DE REPRODUCIRLO O TRANSFERIRLO EN TODO O EN PARTE A OTRA FIRMA O PERSONA SIN SU PREVIA AUTORIZACION ESCRITA.		TITULO: VISTA PRINCIPAL GRUA PESCANTE				
ESCALAS: INDICADAS		PARTE: CAJA 4 Y CAJA 6				
<div><div><div></div></div></div>						



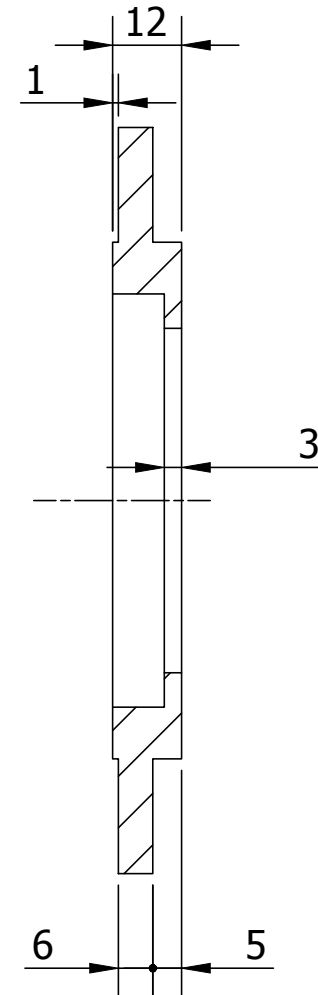
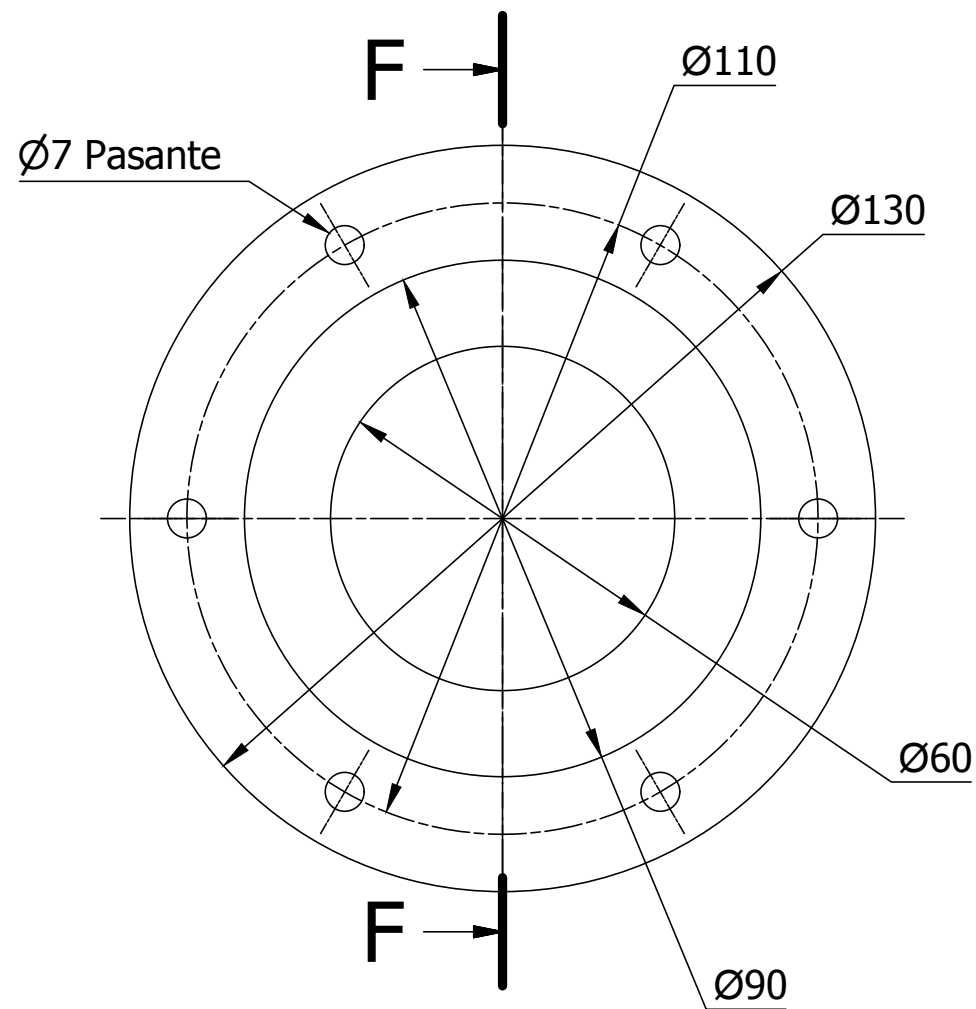
	Realización de plano		J.A.O.H	L.A.U	J.S.G.B	15/08/2018
REV.	DESCRIPCION	JOB TX	EJEC.	CONT.	APRO.	FECHA
PROVEEDOR		N° PROVEEDOR:				
		PLANTA: LARGOS MANIZALES				
		AREA: LAMINACION EN CALIENTE				
		LINEA: LAMINACION TREN 1				
		PROCESO: LAMINADO				
		EQUIPO: GRUA PESCANTE				
LA FIRMA SE RESERVA LA PROPIEDAD DE ESTE ELABORADO CON PROHIBICION DE REPRODUCIRLO O TRANSFERIRLO EN TODO O EN PARTE A OTRA FIRMA O PERSONA SIN SU PREVIA AUTORIZACION ESCRITA.		TITULO: EJE Y BRAZO GRUA PESCANTE				
ESCALAS: INDICADAS		PARTE: CAJA 4 Y CAJA 6				
						

Tornillos de 1-1/2 in  
para anclaje



Piso zona tren continuo

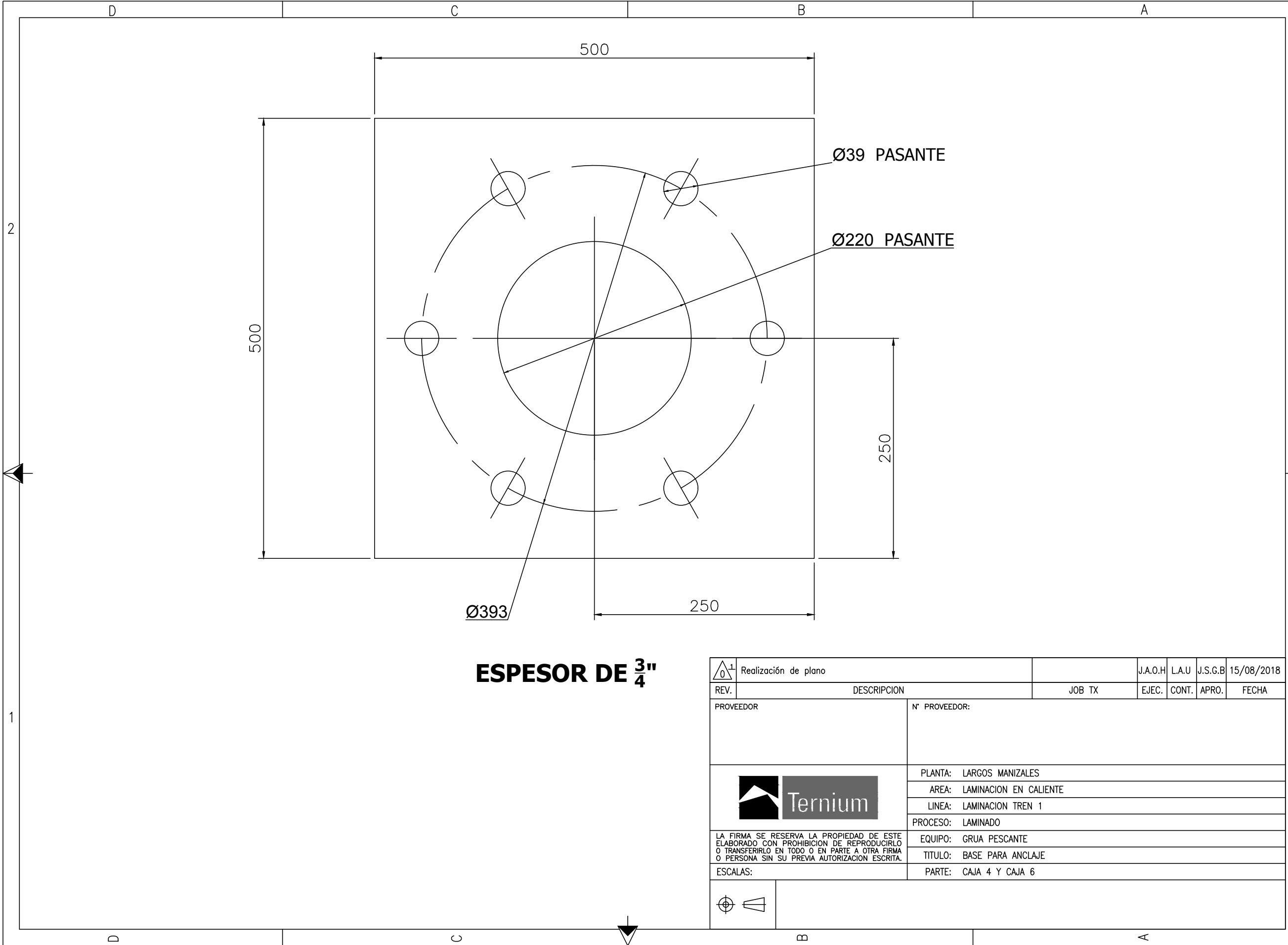
<div><div>0</div><div>1</div></div>	Realización de plano		J.A.O.H	L.A.U	J.S.G.B	15/08/2018
REV.	DESCRIPCION	JOB TX	EJEC.	CONT.	APRO.	FECHA
PROVEEDOR		N° PROVEEDOR:				
<div><div><div></div></div><div>Ternium</div></div>		PLANTA: LARGOS MANIZALES				
		AREA: LAMINACION EN CALIENTE				
		LINEA: LAMINACION TREN 1				
		PROCESO: LAMINADO				
		EQUIPO: GRUA PESCANTE				
LA FIRMA SE RESERVA LA PROPIEDAD DE ESTE ELABORADO CON PROHIBICION DE REPRODUCIRLO O TRANSFERIRLO EN TODO O EN PARTE A OTRA FIRMA O PERSONA SIN SU PREVIA AUTORIZACION ESCRITA.		TITULO: SOPORTE DE BRAZO				
ESCALAS: 1:2		PARTE: CAJA 4 Y CAJA 6				
<div><div></div><div></div></div>						



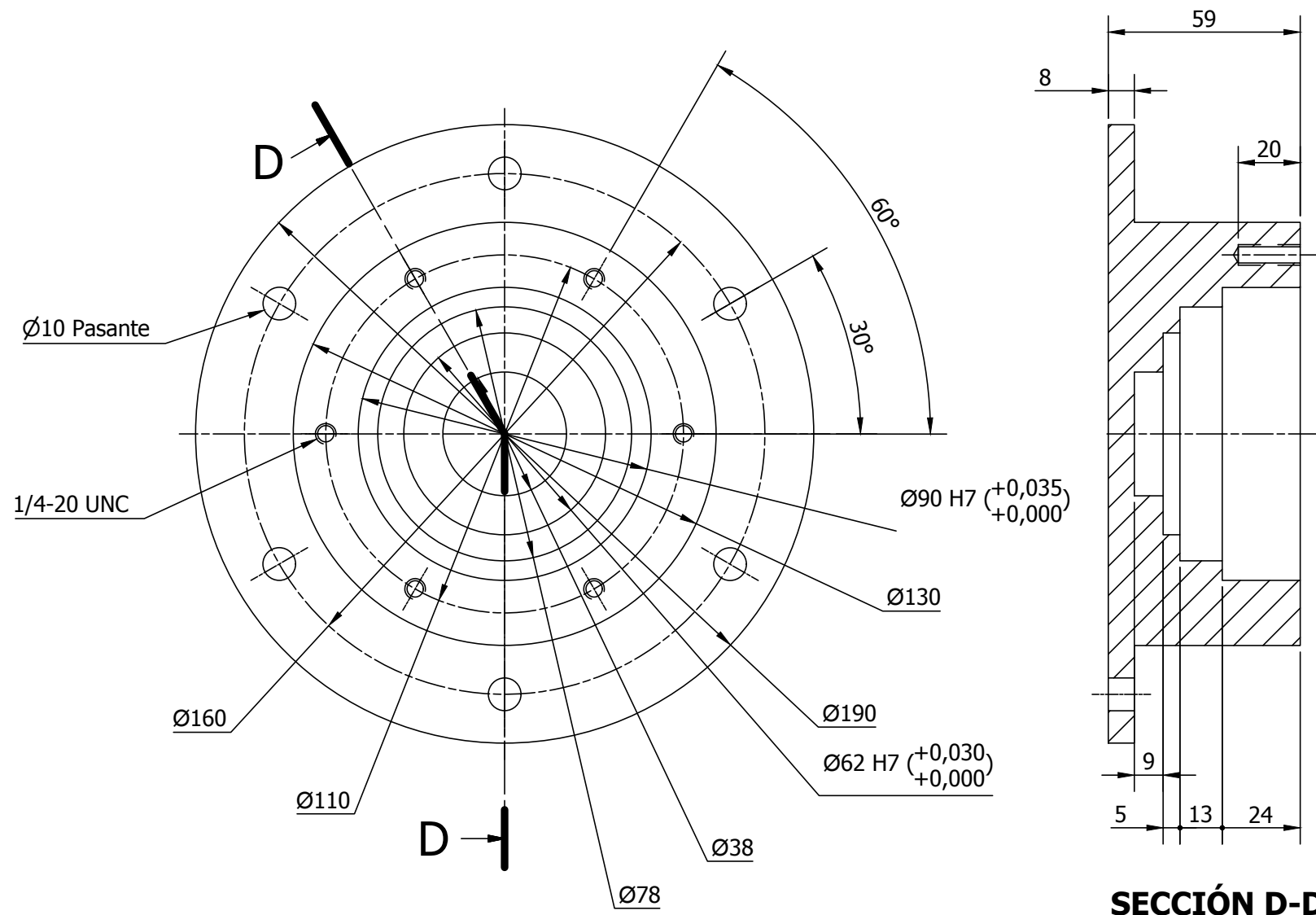
## SECCIÓN F-F



Escala: 1 : 2

<div><div>0</div><div>1</div></div>	Realización de plano			J.A.O.H	L.A.U	J.S.G.B	15/08/2018	
REV.	DESCRIPCION			JOB TX	EJEC.	CONT.	APRO.	FECHA
PROVEEDOR			N° PROVEEDOR:					
<div><div></div><div>Ternium</div></div>			PLANTA: LARGOS MANIZALES					
			AREA: LAMINACION EN CALIENTE					
			LINEA: LAMINACION TREN 1					
			PROCESO: LAMINADO					
			EQUIPO: GRUA PESCANTE					
LA FIRMA SE RESERVA LA PROPIEDAD DE ESTE ELABORADO CON PROHIBICION DE REPRODUCIRLO O TRANSFERIRLO EN TODO O EN PARTE A OTRA FIRMA O PERSONA SIN SU PREVIA AUTORIZACION ESCRITA.			TITULO: TAPA PARA RODAMIENTO					
ESCALAS: 1:2			PARTE: CAJA 4 Y CAJA 6					
<div><div></div><div></div></div>								

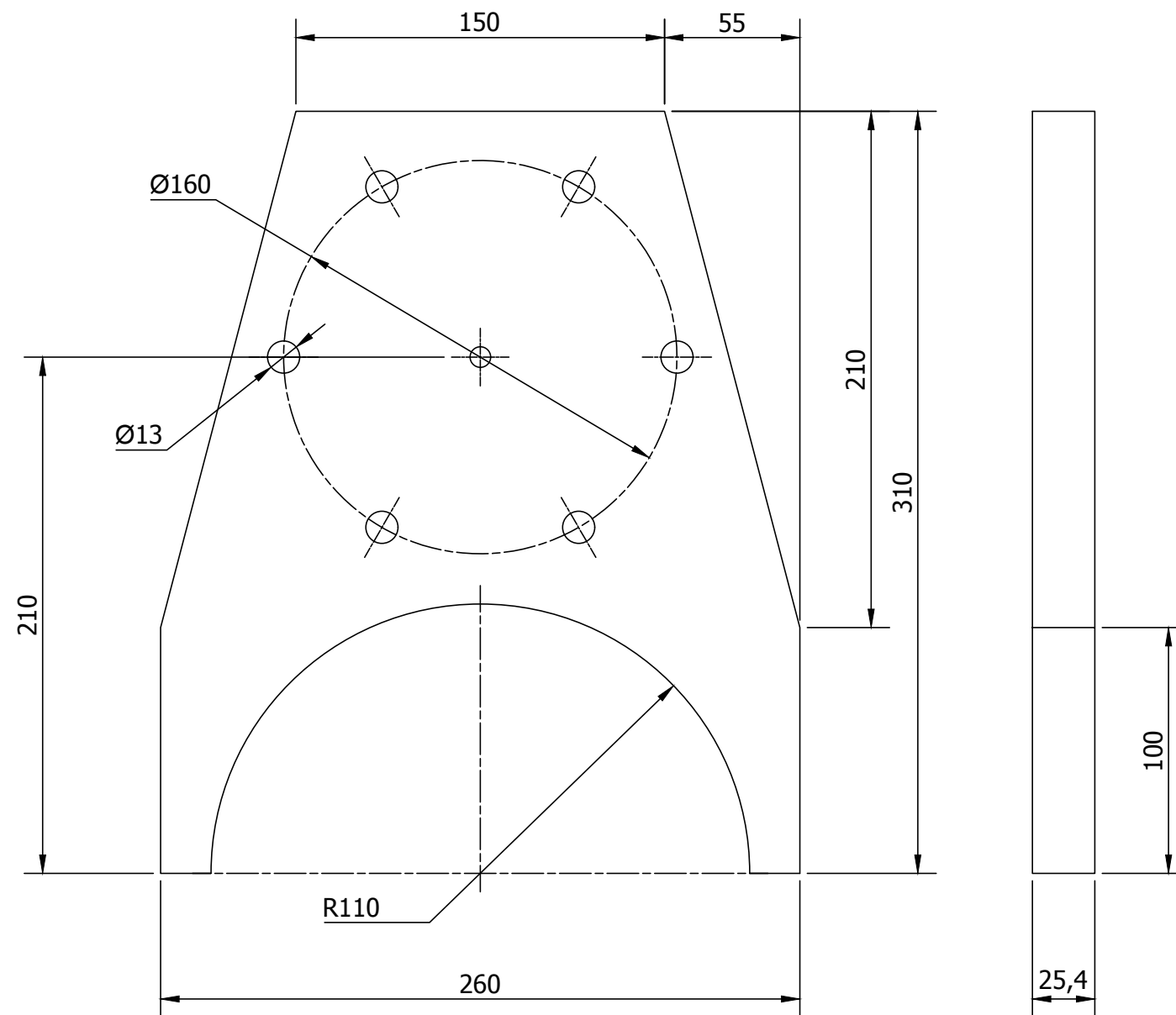


<div><div></div><div>0</div><div>1</div></div>	Realización de plano		J.A.O.H	L.A.U	J.S.G.B	15/08/2018
REV.	DESCRIPCION	JOB TX	EJEC.	CONT.	APRO.	FECHA
PROVEEDOR		N° PROVEEDOR:				
<div><div></div><div>Ternium</div><div>LA FIRMA SE RESERVA LA PROPIEDAD DE ESTE ELABORADO CON PROHIBICION DE REPRODUCIRLO O TRANSFERIRLO EN TODO O EN PARTE A OTRA FIRMA O PERSONA SIN SU PREVIA AUTORIZACION ESCRITA.</div></div>		PLANTA: LARGOS MANIZALES				
		AREA: LAMINACION EN CALIENTE				
		LINEA: LAMINACION TREN 1				
		PROCESO: LAMINADO				
		EQUIPO: GRUA PESCANTE				
ESCALAS:		TITULO: BASE PARA ANCLAJE				
		PARTE: CAJA 4 Y CAJA 6				
<div><div></div><div></div></div>						

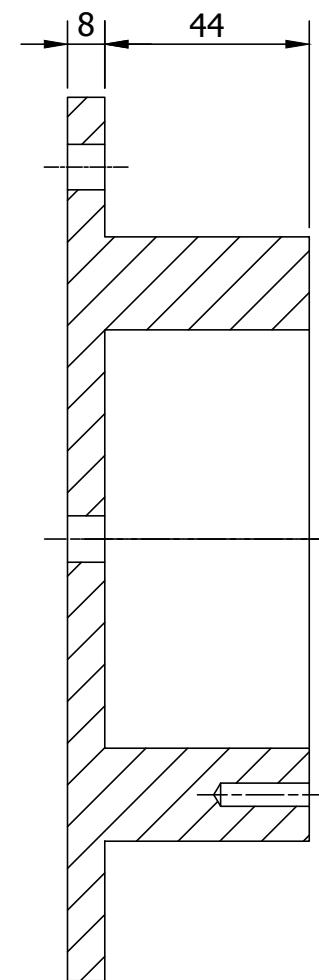
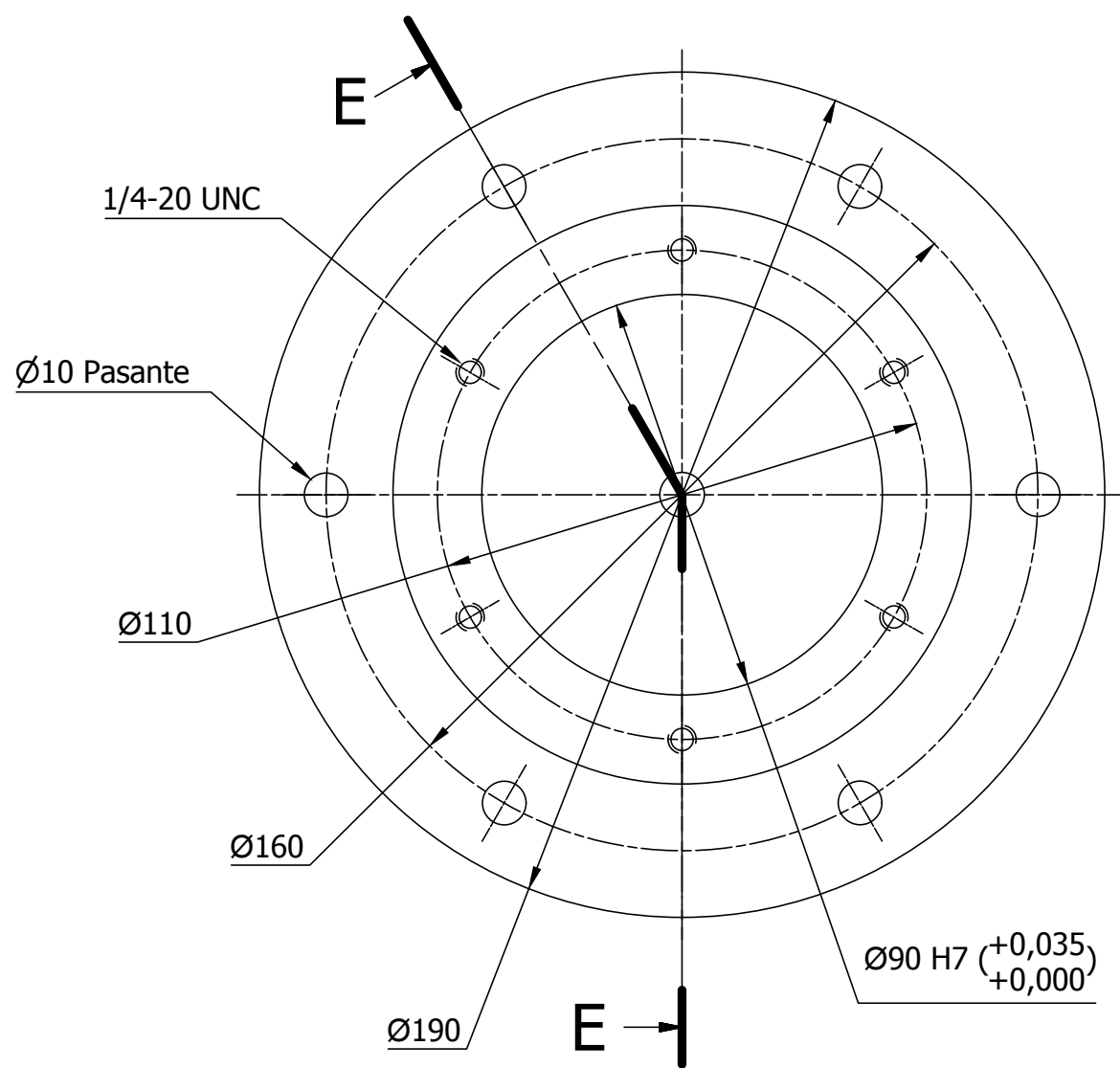


<div><div>0</div><div>1</div></div>	Realización de plano				J.A.O.H	L.A.U	J.S.G.B	15/08/2018	
REV.	DESCRIPCION			JOB TX		EJEC.	CONT.	APRO.	FECHA
PROVEEDOR				N° PROVEEDOR:					
<div><div></div><div>Ternium</div></div>				PLANTA: LARGOS MANIZALES					
				AREA: LAMINACION EN CALIENTE					
				LINEA: LAMINACION TREN 1					
				PROCESO: LAMINADO					
				EQUIPO: GRUA PESCANTE					
LA FIRMA SE RESERVA LA PROPIEDAD DE ESTE ELABORADO CON PROHIBICION DE REPRODUCIRLO O TRANSFERIRLO EN TODO O EN PARTE A OTRA FIRMA O PERSONA SIN SU PREVIA AUTORIZACION ESCRITA.				TITULO: BASE PARA RODAMIENTO INFERIOR					
ESCALAS: 1:2				PARTE: CAJA 4 Y CAJA 6					
<div><div></div><div></div></div>									





<div><div>0</div><div>1</div></div>	Realización de plano		J.A.O.H	L.A.U	J.S.G.B	15/08/2018
REV.	DESCRIPCION	JOB TX	EJEC.	CONT.	APRO.	FECHA
PROVEEDOR		N° PROVEEDOR:				
<div><div><div></div></div><div>Ternium</div></div>		PLANTA: LARGOS MANIZALES				
		AREA: LAMINACION EN CALIENTE				
		LINEA: LAMINACION TREN 1				
		PROCESO: LAMINADO				
		EQUIPO: GRUA PESCANTE				
LA FIRMA SE RESERVA LA PROPIEDAD DE ESTE ELABORADO CON PROHIBICION DE REPRODUCIRLO O TRANSFERIRLO EN TODO O EN PARTE A OTRA FIRMA O PERSONA SIN SU PREVIA AUTORIZACION ESCRITA.		TITULO: ESQUEMA ANCLAJE				
ESCALAS: 1:2		PARTE: CAJA 4 Y CAJA 6				
<div><div></div><div></div></div>						



**SECCIÓN E-E**  
Escala: 1 : 2

<div><div>0</div><div>1</div></div>	Realización de plano			J.A.O.H	L.A.U	J.S.G.B	15/08/2018	
REV.	DESCRIPCION			JOB TX	EJEC.	CONT.	APRO.	FECHA
PROVEEDOR			N° PROVEEDOR:					
<div><div></div><div>Ternium</div></div>			PLANTA: LARGOS MANIZALES					
			AREA: LAMINACION EN CALIENTE					
			LINEA: LAMINACION TREN 1					
			PROCESO: LAMINADO					
			EQUIPO: GRUA PESCANTE					
LA FIRMA SE RESERVA LA PROPIEDAD DE ESTE ELABORADO CON PROHIBICION DE REPRODUCIRLO O TRANSFERIRLO EN TODO O EN PARTE A OTRA FIRMA O PERSONA SIN SU PREVIA AUTORIZACION ESCRITA.			TITULO: BASE PARA RODAMIENTO SUPERIOR					
ESCALAS: 1:2			PARTE: CAJA 4 Y CAJA 6					
<div><div></div><div></div></div>								

